

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra slévárenství

Lité kovové pěny s nepravidelnou buňkovou strukturou
Cast Cellular Metals with Irregular Structure

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Michael Hladký

Studijní program:

N2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor:

2109T033 Slévárenské technologie

Téma:

Lité kovové pěny s nepravidelnou buňkovou strukturou
Cast Cellular Metals with Irregular Structure

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce
3. Analýza současného stavu výroby litých porézních kovů s nepravidelnou strukturou
4. Experimentální ověření vybraných postupů, návrh vlastní metodiky
5. Diskuse dosažených výsledků
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BANHART, J. *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metals foams*. Progress in Materials Science, 46, 2001, pp. 539 – 632.
- [2] DAIRON, J. et. al. *Mousses métalliques: CTIF innove dans les matériaux cellulaires*. Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, No 295, 2009, pp. 12 – 19.
- [3] GAILLARD, Y. et al. *Les mousses d'aluminium CTIF par voie de fonderie*. Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, No 250, 2005, pp. 13 – 24.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Lichý, Ph.D.**

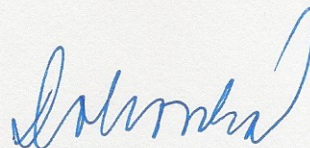
Konzultant diplomové práce: Ing. Ivana Kroupová

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

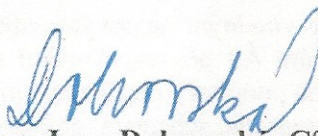
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 27. 4. 2015

Michael Klacil
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Lichému, Ph.D a také konzultantce společně Ing. Ivaně Kroupové za vedení, pomoc, cenné rady a připomínky a také za svatou trpělivost, kterou se mnou měli.

Mé díky patří také panu Ing. Jaroslavu Beňovi, Ph.D. za záchranu v podobě plastové mřížky. Zároveň děkuji všem, kteří se přímo či nepřímo podíleli na vzniku této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá kovovými pěnamí. Rozmach v používání tohoto materiálu nastal s příchodem nových technologií výroby. Díky unikátní kombinaci vlastností (nízká hmotnost, vysoká tuhost, dobrá tepelná vodivost, chemická odolnost) pronikl tento materiál do mnoha oblastí průmyslu. V teoretické části jsou tyto vlastnosti popsány, dále pak je zde představeno několik způsobů výroby kovových pěn. Praktická část je zaměřena na slévářenskou technologii výroby kovové pěny pomocí prekurzorů. Cílem je zajištění výroby prekurzorů za použití materiálů běžně dostupných ve slévářenském provozu. Jako materiál prekurzorů byla zvolena samotuhnoucí furanová směs, která stále patří mezi nejpoužívanější formovací směsi. Následně bylo odlito několik vzorků za použití prekurzorů vyrobených z dané směsi. Na odlitcích byl proveden metalografický rozbor.

Klíčová slova

Kovová pěna, pórovitý kovový materiál, prekurzor, samotuhnoucí furanová směs, odlitek, nepravidelná struktura.

Abstract

This Thesis is focused on metal foams. The expansion of usage metal foams become with new production technologies. Thanks to unique combination of properties (low weight, high rigidity, high temperature conductivity, chemical resistance) find this material usage in many kinds of industry. The theoretical part contains the description of metal foams properties and also there are some of production technologies. Practical part is focused on the production technology of metal foams using the precursors. The aim is production of precursors using materials that are ordinary used in foundry. So as the material of the precursor was selected the self-hardening furan mixture, which still belongs to well used mixture in Czech republic. Some casts was made by using precursors from this mixture. On this casts was made metallographic analysis.

Keywords

Metal foam, porous metal material, precursor, self-hardening furan mixture, cast, irregular structure

Obsah

Úvod	4
1. Vlastnosti	6
1.1 Kvalifikace pórovitosti	7
1.2 Vlastnosti nejpoužívanějších kovových pěn	8
2. Oblasti použití	9
2.1 Automobilový průmysl.....	10
2.2 Stavebnictví a architektura	12
2.3 Medicína	13
2.4 Filtrace	13
2.5 Další odvětví průmyslu	14
3. Výrobní postupy	15
3.1 Výroba porézního kovu z taveniny	16
3.1.1 Přímé zpěňování taveniny.....	16
3.1.1.1 Zpěnění pomocí dvou kovů	16
3.1.1.2 Přímé zpěnění plynem.....	17
3.1.1.3 Zpěnění pomocí zpěňovadla	18
3.1.2 Slévárenské metody	19
3.1.2.1 Materiály s mřížovou strukturou.....	20
3.1.2.2 Zalití prekurzorů	21
3.1.2.3 Lití na odpařitelný model.....	22
4. Praktická část.....	24
4.1 Technologie výroby kovových pěn pomocí prekurzorů.....	25
4.2 Anorganické prekurzory	26
4.2.1 Keramzitové prekurzory	26
4.3 Organické prekurzory	27
4.3.1 Prekurzory z organického materiálu	27
4.3.2 Prekurzory na bázi organických pojiv	28
4.3.2.1 Prekurzory vyrobené metodou Croninga	28
4.4 Prekurzory vyrobené ze samotuhnoucí furanové směsi	29
4.4.1 Výroba formy.....	32
4.4.2 Odlévání.....	33
4.4.3 Výsledné vlastnosti.....	36

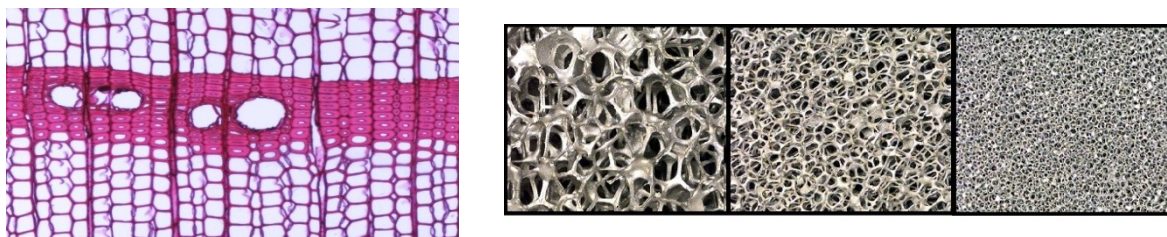
4.4.3.1 Pórovitost	36
4.4.3.2 Metalografický rozbor	38
4.4.4 Teoretický návrh síťového mlýnu	42
Závěr	44
použitá literatura	45

Úvod

Výroba kovových pěn se datuje již od začátku 20. století, kdy našly své využití v oblasti strojírenství. Výroba filtrů, baterií a samomazných ložisek přispěla ve 20. letech 20. století k rozmachu a využití kovových pěn jako konstrukčního materiálu. Ve stejné době se začala používat výroba pomocí spékání kovových prášků. První patent na výrobu zpěněním pochází z Francie, kde byl přihlášen v roce 1925. Následně až o třicet let později v USA začala velkosériová výroba. Bližší výzkum a vývoj tohoto materiálu začal až 90. v letech minulého století [1].

Pro dnešní konstrukce jsou využívány pevné a těžké materiály, jako jsou ocelové nosníky, beton a sklo. Na obrázku 1.1 lze porovnat buněčnou strukturu dřeva a pěnového kovu. Kovové pěny nabízí celkové odlehčení dané součásti a zároveň si zachovávají i dobré mechanické vlastnosti. Porézní struktura propůjčuje materiálům za daných podmínek unikátní vlastnosti jako je dobrá tepelná vodivost, vysoká pevnost i tuhost, schopnost pohltit velké množství nárazové energie, izolace zvuku. Neobvyklé kombinace vlastností způsobily průnik kovových pěn prakticky do všech známých odvětví průmyslu, kde začaly nahrazovat původní součásti a výrobky s plnou strukturou. Jejich obrovskou výhodou bylo navázání na trend dnešní doby odlehčování konstrukcí. Díky své porézní struktuře tuto podmínku splnily, a v některých případech nabídly lepší praktické vlastnosti než původně využívaný výrobek. Například stavebnictví nabídlo tepelný a hlukový izolátor se zajímavým a imponujícím vzhledem. Medicína tento materiál využila pro vylepšení dosavadních způsobů léčby, příkladem může být použití pěnových kovů při léčbě zlomenin [1].

Materiál s vysokým stupněm pórovitosti je označován jako „pórovitý kov“ nebo „porézní kov“. Kovová pěna je označení pro materiál, který byl vyroben zpěněním taveniny a jeho struktura je buněčného charakteru. Materiál, jehož póry jsou složitě propojeny a nevykazuje tak buněčnou strukturu je označován jako kovová houba [1].



Obr. 1.1 Ukázka porézní struktury dřeva (vlevo) a slitiny kovu (vpravo) [2,3]

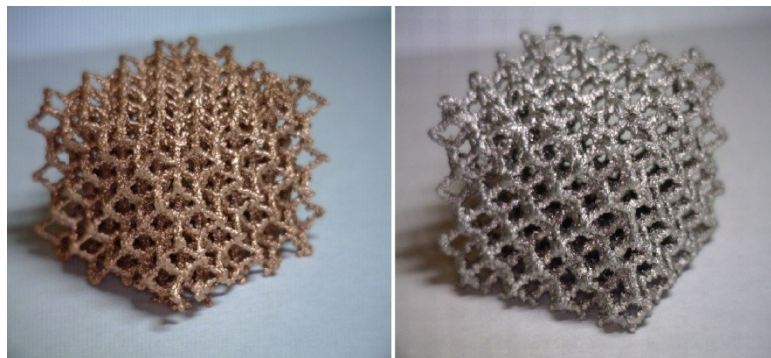
Cílem teoretické části diplomové práce je představení kovových pěn. V následujících kapitolách jsou popsány vlastnosti a také několik způsobů výroby kovových pěn z tekuté fáze. V praktické části se zaměřuji na technologii výroby pomocí prekurzorů. Cílem praktické části je zajištění dané technologie za použití materiálů běžně dostupných ve slévárenském provozu. Jako základ prekurzorů byla zvolena samotuhnoucí furanová formovací směs (furanová ST – směs). Pro výrobu kovových pěn byly použity tři slitiny: slitina hliníku, slitina železa a slitina mědi. Na odlitých vzorcích byl vyhodnocen zvolený technologický postup.

Teoretická část

1. Vlastnosti

Hlavní výhodou těchto materiálů je jejich neobvyklá kombinace vlastností, jako je vysoká tuhost a zároveň nízká hustota, dobrá tepelná vodivost a absorpce nárazové energie a další. Proto jsou využívány v místech, kde lze aplikovat alespoň dvě nebo více vlastností. Na základě specifických parametrů jednotlivých kovů a slitin, je možno použít širokou škálu kovů pro dosažení požadovaných vlastností. Pro výrobu kovových pěn se využívají slitiny Al, Mg, Zn, Ti, Pb, Cu, Fe, Ni. Na obrázku 1.2 můžeme vidět ukázkou kovových pěn s pravidelnou strukturou. Na výsledných vlastnostech pěnových kovů se podílí řada faktorů, z nichž ty nejdůležitější jsou:

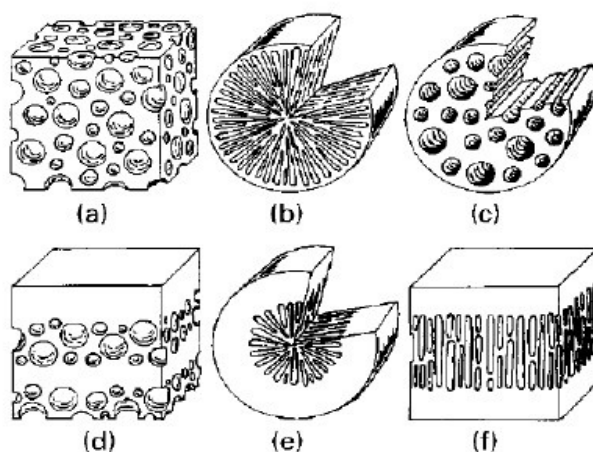
- morfologie - otevřené či uzavřené póry, množství na jednotku objemu
- materiál - chemické složení slitiny, výsledná mikrostruktura
- zpracování - zda je rozložení póru nahodile nebo pravidelně uspořádáno
- ekonomika - náklady na výrobu, sériová nebo kusová [4,5]



Obr. 1.2 Ukázka kovové pěny ze slitiny Cu (vlevo) a Al (vpravo) [6]

1.1 Kvalifikace pórovitosti

Existuje řada parametrů, které blíže určují vlastnosti daného porézního materiálu. Mezi ty hlavní patří: stupeň pórovitosti, průměr pórů, objem jednotlivých buněk nebo kanálek, tvar, stupeň propojení pórů, chemické složení slitiny a její vlastnosti. Pokud je pro porézní materiál použita metoda výroby z tekuté fáze, pak je orientace pórů podřízena směru teplotního gradientu. Orientace pórů, jejich velikost, tvar a stupeň propojení určují výsledné vlastnosti materiálu, nejvíce pak tepelnou vodivost, schopnost tlumit rázy a pohlcovat energii. Hodnota pórovitosti a samotná orientace pórů (obr. 1.3) je závislá na použité technologii, proto se její hodnota může pohybovat od 40 % do 98 %. Výše této hodnoty určuje, jaké procento zaujímají všechny póry z celkového objemu výrobku [7,8].



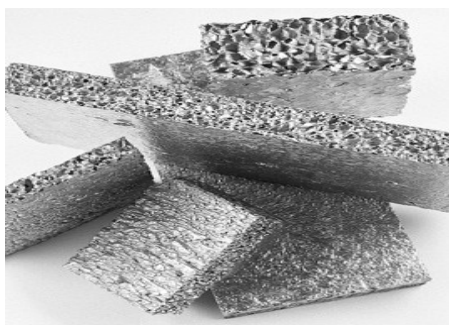
Obr. 1.3 Tvary a rozmístění pórů; a) kulaté póry, b) radiální, c) válcové, d) až f) lamelární rozložení [7]

1.2 Vlastnosti nejpoužívanějších kovových pěn

V tabulce 1.1 je vypsán přehled vlastností komerčně nejpoužívanějších kovových pěn. Jak lze vyčíst z tabulky, hlavním materiálem kovových pěn je hliník, pouze v jenom případě je to nikl. Díky svým slévárenským vlastnostem, ceně a mechanickým vlastnostem zaujímá hliník jednoznačně první místo jako nepoužívanější materiál kovových pěn. Další kovy jako jsou měď, titan nebo hořčík jsou využívány méně. Hořčík je využíván zejména jako biologicky odbouratelná slitina, proto je používán zejména v medicíně. Měď je využívána u tepelných výměníků pro svou dobrou tepelnou vodivost oproti hliníku má však horší slévárenské vlastnosti. Na obrázku 1.4 lze vidět příklady kovových pěn popsanych v tabulce 1.1 [9].

Tab. 1.1 Přehled vlastností komerčně využívaných pěn [9]

Produkt (výrobce) Vlastnost (jednotka)/symbol	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	Inco
materiál	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
relativní hustota ρ/ρ_s (-)	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Struktura (-)	uzavř. buňky	uzavř. buňky	uzavř. buňky	otevř. buňky	otevř. buňky
hustota ρ ($10^3 \cdot \text{kg/m}^3$)	0,07-0,56	0,3-1,0	0,2-0,25	0,16-0,25	0,26-0,37
Youngův modul E (GPa)	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Smykový modul G (GPa)	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
modul objemové pružnosti K (GPa)	0,02-3,2	1,8-13,0	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
modul pružnosti v ohybu E_f (GPa)	0,03-3,3	1,7-12,0	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonův poměr ν (-)	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
mez pevnosti v tlaku σ_c (MPa)	0,04-7,0	1,9-14,0	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
mez pružnosti v tahu σ_v (MPa)	0,04-7,0	2,0-20	1,6-1,8	0,9-2,7	0,6-1,1
mez pevnosti v tahu σ_t (MPa)	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
MOR σ_{MOR} (MPa)	0,04-7,2	1,9-25	1,8-1,9	0,9-2,9	0,6-1,1
mez únavy σ_e^c (MPa)	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
deformace zhuštění ε_D (-)	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
tažnost ε_f (-)	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
ztrátový součinitel η^c (%)	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
tvrdost H (MPa)	0,05-10	2,4-35	2,0-2,2	2,0-3,5	0,6-1,0
lomová houževnatost K_{IC}^c (MPa.m ^{1/2})	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0
teplota tavení T_m (K)	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
max. provozní teplota T_{max} (K)	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
min. provozní teplota T_{min} (K)	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
specifické teplo C_p (J/kg.K)	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
tepelná vodivost λ (W/m.K)	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
koefficient tep.roztažnosti α ($10^{-6}/\text{K}$)	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
latentní teplo tání L (kJ/kg)	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310
odpor R ($10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500



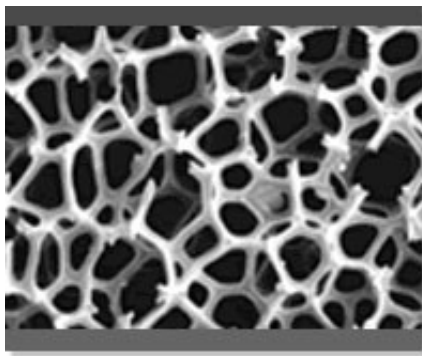
a)



b)



c)



d)



e)

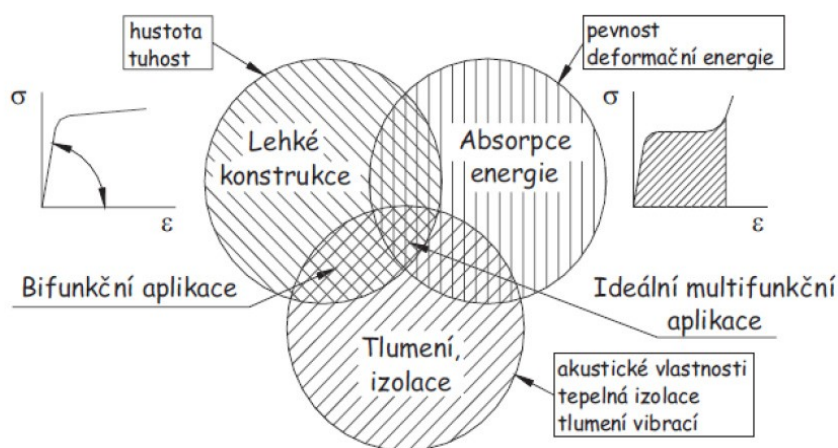
Obr. 1.4 příklady kovových pěn z tab. 1.1 a) Cymat b) Alporas c) ERG d) Inco e) Alulight
[10,11,12,13,14]

2. Oblasti použití

Důvodem toho, že slitiny hliníku jsou nejpoužívanější v oblasti kovových pěn, jsou vlastnosti hliníku. Zejména nízká hustota, teplota tavení, vysoká tuhost a korozní odolnost. Mezi jeho další přednosti patří nehořlavost, recyklovatelnost a zdravotní nezávadnost. Nejdůležitějším faktorem z hlediska použití kovových pěn je morfologie pórů,

v případě filtrace je požadováno, aby materiálem mohla proudit kapalina či plyn. Oproti tomu stojí nosné konstrukce, kde je vyžadována morfologie s uzavřenými póry [4,5].

Pěnové materiály se uplatnily v mnoha oblastech průmyslu. Mezi největší odběratele patří automobilový průmysl, stavebnictví, architektura a medicína. Důležitým aspektem při použití kovových pěn a jejich finální aplikaci je využití jejich vlastností. Jak napovídá obr. 2.1, je žádoucí, aby bylo dosaženo průniku ideální multifunkční aplikace. To však není vždy možné, proto by měla být využita minimálně kombinace dvou. Příkladem může být rám automobilu vyplněný pěnovým hliníkem, plně využívá dvou vlastností, tvoří lehkou konstrukci a zároveň pohlcuje nárazovou energii [4,5].



Obr. 2.1 Aplikací možnosti pěnového hliníku [5]

2.1 Automobilový průmysl

V dnešním světě jsou kladeny vysoké nároky na ekologii v průmyslu (snížování emisí, prašnosti, hluku). Tyto nároky jsou kladeny také na automobilový průmysl a automobily jako takové. Emise z automobilů jsou hlavním problémem velkých měst. Jedno z řešení jak snížit emise ze spalovacích motorů, je snížení hmotnosti konstrukce automobilu. To s sebou však nese riziko snížení bezpečnosti v případě nehody. Odlehčením konstrukce dochází k prodloužení deformační zóny při nárazu. Jak už bylo zmíněno, kovové pěny navzdory nízké hmotnosti dokážou pohltit značné množství nárazové energie [4].

Vyztužením součástí pěnovým hliníkem lze odlehčit danou konstrukci a zároveň zachovat potřebné mechanické vlastnosti, zejména oblast tlakového namáhání. Pěnový hliník tvoří výplň sendvičových panelů a trámových konstrukcí (obr. 2.2), může také tvořit trvalá jádra hliníkových odlitků. Těmito úpravami konstrukce automobilu lze snížit jeho celkovou hmotnost. Výsledkem je snížení spotřeby paliva bez narušení bezpečnosti. Schopnost dobře absorbovat energii umožnila konstruovat malá městská vozidla, která díky nízké hmotnosti nemají vysokou spotřebu paliva. Rozvíjející se technologie v různých oblastech techniky umožnily konstrukce elektromobilů, dokonce i na solární pohon. Nevýhodou tohoto druhu automobilů je jejich krátká dojezdová dráha. Ta může být navýšena díky snížení hmotnosti [5].



Obr. 2.2 Profil rámu automobilu vyplněný pěnovým hliníkem [15]

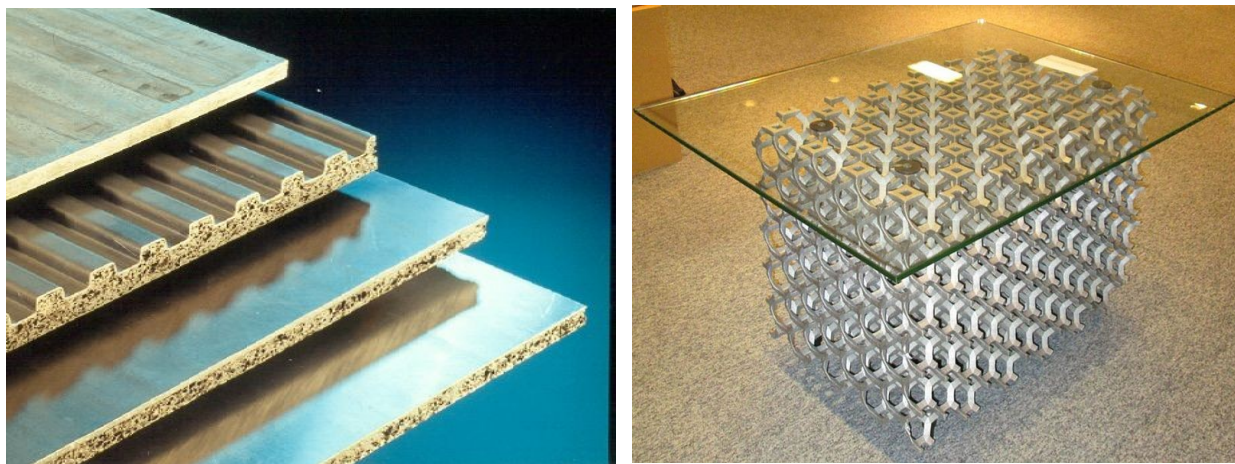
Také armáda využila tento materiál jako doplněk pancířů obrněných vozidel. Panel z pórovitého kovu výborně pohlcuje energii tlakové vlny vzniklé výbuchem. Princip spočívá právě v jeho buněčné struktuře, která účinek nárazu tlakové vlny rozloží na jednotlivé póry. Snižuje se tak pravděpodobnost průniku tlakové vlny do kabiny vozu. Zároveň kombinace s korundovou keramikou vede ke zvýšené odolnosti proti průchodu projektilu [1,16].

Se zvyšujícím se počtem automobilů na silnicích se objevila poptávka po tlumičích akustické emise z dopravy. Kovové pěny umožnily kvalitní řešení těchto problémů. Existuje technologie přímé výroby panelů z pěnového kovu, které mohou být použity jako odhlučňovací stěny okolo dálnic a frekventovaných cest [4].

2.2 Stavebnictví a architektura

Ve stavebnictví našly pěnové materiály své uplatnění ve formě panelů. Tyto panely mohou být použity pro výrobu protipožárních dveří, jelikož hliníkové pěny jsou stabilní při kontaktu s otevřeným ohněm, i když je teplota tání hliníku 660°C. Pro svou nízkou měrnou hmotnost mohou být použity také jako konstrukce výtahů. Snížení hmotnosti se pak projevuje při spotřebě energie potřebné k provozu výtahů a také ke snížení energie nutné k zabrzdění výtahu ve vysokých budovách [4].

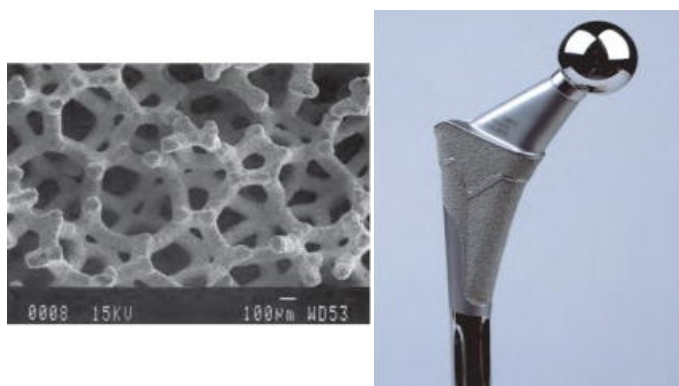
Jednou z předností hliníkových pěn je jejich ekologická nezávadnost, schopnost dobře tlumit akustické emise a tepelně izolovat. Proto se začaly využívat jako stavební prvek při stavbě příček kajut lodí, stěn letadel, autobusů, vlaků, ale i jiných prostor, ve kterých se shromažďuje velký počet osob. Díky impozantnímu a zajímavému vzhledu se postupně také začíná stávat součástí běžného bydlení ve formě obložení stěn, nebo jako nábytek. Panel z pěnového kovu může být použit jako pracovní plocha stolu, ten se pak stává moderním a zajímavým doplňkem interiéru. Na obrázku 2.3 vpravo lze vidět další využití pěnového hliníku jako doplňku interiéru. Hliník a další antikorozi slitiny jsou vhodné i pro venkovní použití [4].



Obr. 2.3 Panely z pěnového hliníku (vlevo) a tělo stolu vyrobené z kovové pěny s pravidelnou strukturou (vpravo) [17,18]

2.3 Medicína

V medicíně se dnes běžně využívají kovové implantáty a kloubní náhrady. Tělo implantátu tvoří kov s plným průřezem. Materiálem jsou pak speciální oceli či titanové slitiny. Nahrazení některé části nebo celého implantátu s plnou strukturou pórovitým materiálem, rozšířilo možnosti implantátu. Na obrázku 2.4 lze vidět, jak původně plná část kloubní náhrady byla nahrazena pěnovou součástí, která umožní prorůstání kostní tkáně skrz pórovitou část. To umožní lepší propojení kosti a implantátu. Toho, že pórovité implantáty umožní vrůstání pacientovy tkáně, se využívá např. u složitých zlomenin, kde implantát slouží jako nosná konstrukce kostí až do doby celkového zhojení. Pokud je implantát vyroben z hořčíkových slitin, je biologický odbouratelný, dochází pak během hojení k postupnému odbourání implantátu tělem [4,19].



Obr. 2.4 Kloubní náhrada doplněná o součást s pěnovým kovem [20]

2.4 Filtrace

Dalším průmyslovým odvětvím je výroba filtrů pro zachytávání pevných či kapalných částic v plynném médiu a filtrů, které zachytávají částice pevné rozptýlené v kapalině. Na obrázku 2.5 lze vidět přímé využití pro kapalinu (olejový filtr) a plyn (filtr dýchacího přístroje). Nejpoužívanějším materiálem pro filtry jsou hliníkové slitiny. Hliníkové filtry se dají také využít k filtraci vody, kde díky chemické reakci mezi vodou a filtrem dochází k jejímu čištění (snížení koncentrace nežádoucích iontů, např. ionty chromu) [4].



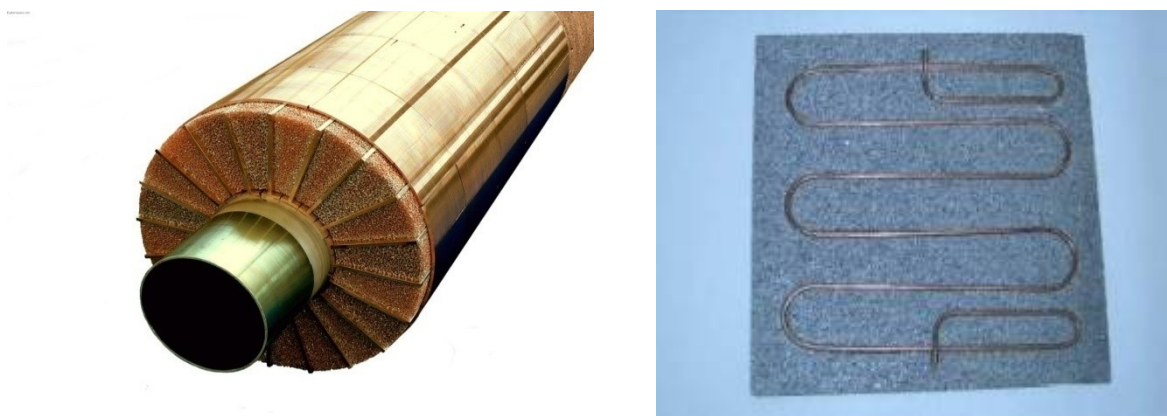
Obr. 2.5 Olejový filtr (vlevo) a součástky pro dýchací přístroje (vpravo) [21]

Díky své teplotní stálosti mohou být filtry využity i k čištění průmyslových spalin, kde mohou být umístěny blíže ke zdroji (např. spaliny z tavicích agregátů) [4].

2.5 Další odvětví průmyslu

Mezi další význačnou vlastnost pěnového hliníku patří dobrá schopnost tlumit vibrace a zvukové emise. Polymerní pěny mají vyšší schopnost tlumit zvukové emise, ale jsou nahrazovány pěnovým hliníkem v prostředí, které má vyšší nároky na tuhost a nehořlavost materiálu (pouzdra tepelných zdrojů, průmyslové plováky v prostředí vysokých teplot a tlaků) [1].

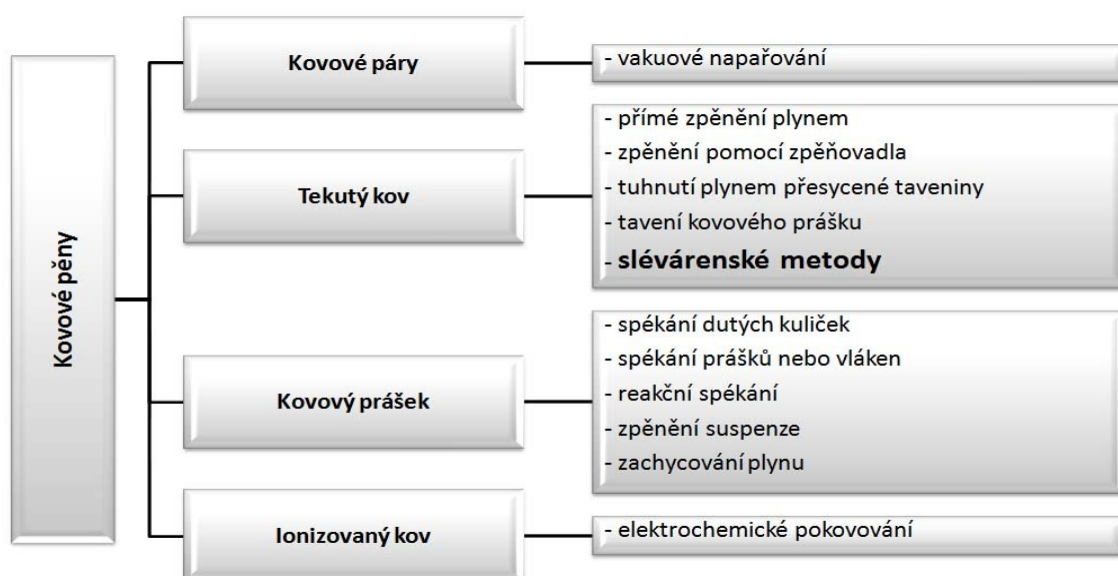
Využívány jsou i v oblasti tepelné regulace. Struktura s uzavřenými póry tepelnou vodivost snižuje. Pokud je požadavkem dobrá tepelná vodivost volí se struktura s otevřenými póry. Doplnují tak konstrukci výměníku tepla, tepelných izolátorů a nehořlavých tepelných štítů. V případě otevřených pórů lze jimi nechat proudit plynné či kapalné médium, které může sloužit jak k ochlazování, tak k ohřívání pěny [22,23]. Na obrázku 2.6 jsou uvedeny příklady praktického použití, trubka obložená měděnou pěnou zvyšuje účinnost výměny tepla. Dále pak podlahová krytina z pěnového hliníku, doplněná o měděnou trubku, ve které bude proudit teplé médium a pórovitá struktura hliníku zajistí rovnoměrné rozvedení tepla po celé ploše panelu [21,24].



Obr. 2.6 Ukázka měděného výměníku tepla a podlahové krytiny z hliníkové pěny [21,24]

3. Výrobní postupy

Výroba kovových pěn se dělí do čtyř základních skupin (obr. 3.1). Dělí se podle toho, v jaké formě je využíván kov pro výrobu pěny (kovové páry, tekutý kov, kovový prášek a ionizovaný kov). Zároveň každá těchto z technologií byla vyvinuta v závislosti na požadované vlastnosti a využití kovové pěny. Slévárenské metody se zabývají výrobou tvarově složitých odlitků z kovové pěny nebo vyplňováním již hotových součástí. Zatímco přímé zpěňování taveniny plynem je nejčastěji využíváno k výrobě pórovitých desek, které jsou následně upravovány pro další využití. Hodnota pórovitosti je řízena množstvím dmýchaného plynu. Některé z těchto postupů byly inspirovány technologií pro zpěnění polymerů a jiné byly vyvinuty v závislosti na specifické vlastnosti požadované slitiny [4].



Obr. 3.1 Přehled technologií používaných pro výrobu

3.1 Výroba porézního kovu z taveniny

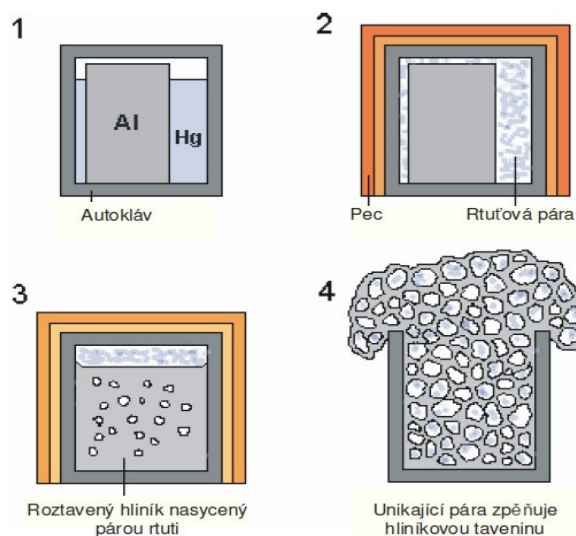
Tato technologie využívá k vytvoření porézní struktury taveninu požadované slitiny. Využívá při tom principu vytvoření rovnoměrně rozložených bublin v tavenině, kdy jejich vyplouvání zabraňuje uměle snížená viskozita taveniny přidáním jemných keramických částic nebo stabilizačních přísad. Porézní struktury lze také dosáhnout zalitím výplňového materiálu, kdy po jeho odstranění zůstane porézní struktura materiálu. Jedním ze způsobů výroby může také být natavení kovového prášku, ten při rozkladu uvolňuje plyn, který tvoří póry [4].

3.1.1 Přímé zpěňování taveniny

3.1.1.1 Zpěnění pomocí dvou kovů

Tento způsob byl poprvé použit v roce 1948. Využíval principu natavení dvou kovů, kdy teplota vypařování jednoho z kovů dosahuje výrazně nižších hodnot než teplota vypařování kovu druhého. Jak lze vidět na schématu výroby (obr. 3.2), nejčastěji byla používána kombinace rtuti ($T_{\text{var}} = 356,73^{\circ}\text{C}$) a hliníku. Dosažení požadovaného výsledku vyžadovalo vytvoření tlaku na hladinu taveniny, který zabraňuje úniku par rtuti. K tomu se využíval autokláv, kde proběhlo natavení kovu a rtuti a ohřátí taveniny nad teplotu vypařování rtuti. Díky tlaku nad hladinou taveniny vznikla uvnitř autoklávu tavenina hliníku přesycená parami rtuti. Po dosažení požadované teploty se tavenina vyjme z autoklávu, jakmile přestane působit přetlak na hladinu taveniny, dochází k expanzi par rtuti a tvorbě pěny [25].

Nevýhody této technologie byly natolik velké, že nikdy nedošlo většímu rozšíření v průmyslu. Neexistovala žádná možnost řízení morfologie pěny, jednotlivé odlitky tak měly vždy rozdílnou strukturu pórů a tudíž i vlastnosti. Při expanzi par a následném tuhnutí měla pěna vysoký sklon k zborcení. Expanze dosahovala vysokých rychlostí, tudíž hrozilo nebezpečí výbuchu. Také páry rtuti jsou vysoce nebezpečné pro lidské zdraví [25].

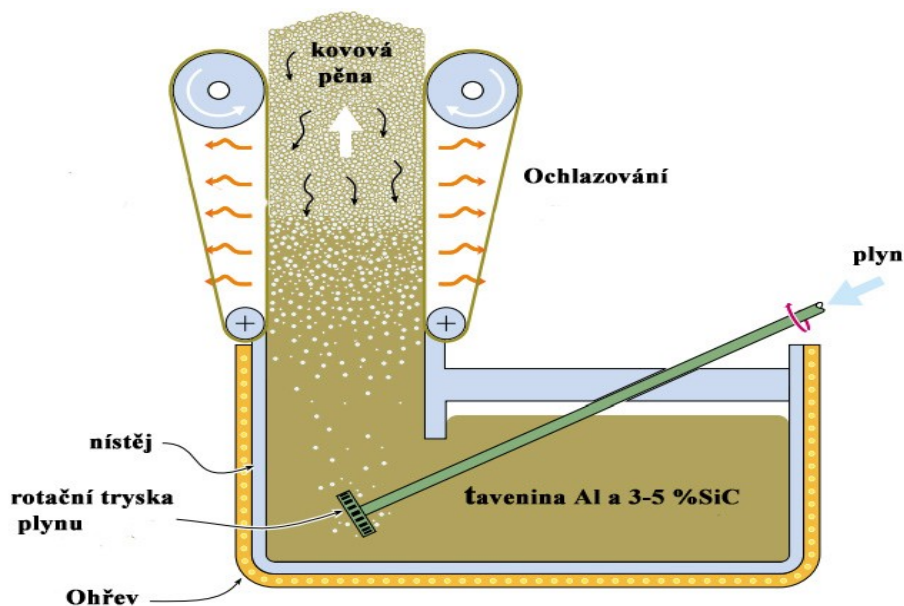


Obr. 3.2 Schéma výroby za použití par rtuť [25]

3.1.1.2 Přímé zpěnění plynem

Jak už napovídá název, technologie spočívá v injektáži plynu do taveniny pomocí rotačního nebo vibračního dmyhadla a vytvoření malých bublin stejnoměrně rozmístěných v celém objemu taveniny a jejich setrvání v tavenině až do úplného ztuhnutí. Tato technologie ale vyžaduje přimíchání jemných keramických částic v objemu od 10 do 20 % na taveninu. Rozmezí rozměru částic je od 5 do 20 μm . Nejčastěji používané keramické částice jsou SiC , Al_2O_3 , MgO , jejich účinek spočívá ve snížení viskozity taveniny. Důležitá je správná volba optimálního úhlu smáčení, pokud je úhel příliš malý nebo příliš velký, nedojde ke vzniku stabilizačního účinku. Následně se provádí injektáž plynu (dusík, argon, vzduch) pomocí dmyhadla, které stejnoměrně rozptýluje bubliny plynu v tavenině. Tuhnutí takto vzniklé stabilizované pěny probíhá při vytahování pomocí pásového dopravníku z pece. Existují dva druhy využití této technologie: vodorovné kontinuální lití (obr. 3.3) a nízkotlaké lití [26,27].

Jednou z předností kontinuálního lití je možnost tvorby velkého množství pěny, až $900 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, a možnost řízení tloušťky desky a množství pórů. Hustota takto vyrobené pěny nabývá rozmezí hodnot $0,69 - 0,54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, což odpovídá 80 až 98 % pórovitosti, přičemž velikost pórů je od 3 do 25 mm a jsou z větší části uzavřené. Tloušťka stěn se pohybuje od 50 do 85 μm . Nutnost ořezání pěnového polotovaru zapříčiňuje otevření pórů, což je jednou z mála nevýhod této technologie [4,25,26,28,29].



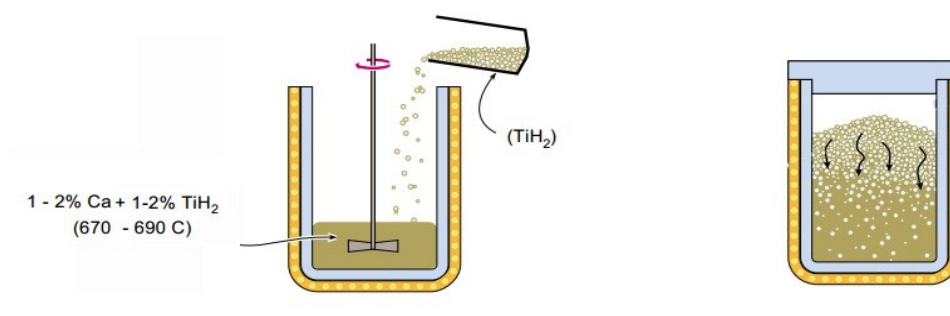
Obr 3.3 Schéma výroby pomocí injektáže plynu do taveniny [30]

Technologie nízkotlakého lití je využívána pro lití trojrozměrných pěnových odlitků, nebo pro výplň dutin pěnovým kovem již hotových součástí. Do dutiny formy je vtlačována tavenina již obsahující keramické částice. Dmychadlo umístěné ve formě pak vhání do taveniny plyn, který vytváří pórovitou strukturu odlitku [26].

3.1.1.3 Zpěnění pomocí zpěňovadla

Tato metoda je používána již od roku 1986 japonskou firmou Shinko Wire a principem je přidání zpěňovadla do taveniny, které při tepelném rozkladu uvolňuje plyn, který následně tvoří póry (obr 3.4). Tato technologie spočívá v tom, že se při teplotě 680°C do taveniny přidá kovový vápník, 1,5 až 3 hm%, který zvyšuje viskozitu taveniny na základě vzniku CaO , CaAl_2O_3 , někdy také intermetalické sloučeniny Al_4Ca . Po dosažení správné viskozity se přidá zhruba 1,6 hm% hydridu titanu (TiH_2), u něhož dochází při teplotě 680°C k disociaci vodíku, který tvoří bubliny. Začne probíhat expanze taveniny a růst jejího objemu. Dojde k úplnému vyplnění dutiny formy a následnému ztuhnutí. Takto získaný blok pěnového hliníku se vyrábí zhruba ve velikosti $2400 \times 700 \times 450$ mm o hmotnosti zhruba 180 kg. Tento polotovár lze pak dále upravit dělením na jiné výrobky. Po odřezání souvislé povrchové vrstvy bloku nabývá hustota hodnot od 0,18 do $0,24 \text{ g.cm}^{-3}$ a průměr pórů dosahuje hodnot od 2 do 10 mm. Struktura tohoto materiálu je vysoce homogenní a charakteristické jsou pro ni uzavřené póry. Recyklace takto zpracovaného hliníku je velmi omezená z důvodu

vysokého obsahu vápníku. Nevýhodou této technologie je nízká hodnota pevnosti v tahu, z důvodu absence souvislé povrchové vrstvy. Výrobky získané touto technologií našly své využití v architektuře, kde se využívá jejich tepelných a zvuko-izolačních vlastností. Desky jsou využívány jako jádra sendvičových panelů [4,5,25,29].



Obr. 3.4 Zjednodušené schéma výroby pomocí zpěňovadla [30]

3.1.2 Slévárenské metody

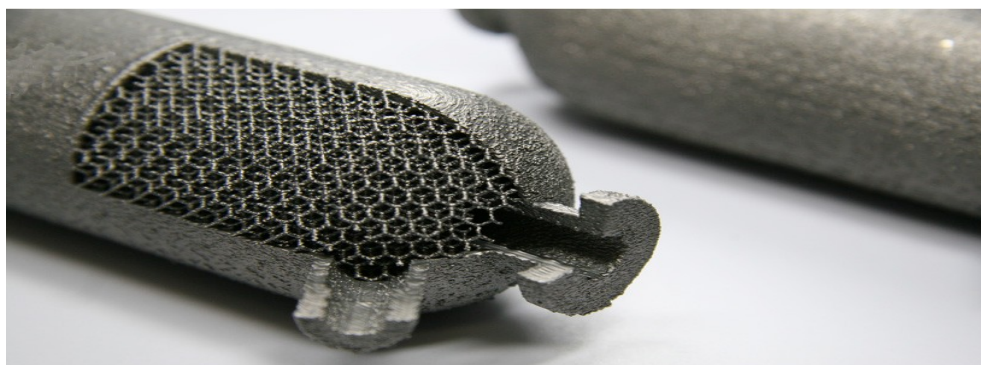
Slévárenské metody jsou využívány k výrobě pěny jak s nepravidelnou tak i s pravidelnou strukturou. V současné době jsou používány tři hlavní způsoby výroby. K produkci odlitků s nepravidelnou strukturou je využívána technologie výroby za pomoci prekurzorů a technologie lití na odpařitelný model. Pro výrobu odlitků s pravidelnou strukturou se vyrábí modelové zařízení s požadovanou strukturou. Značnou výhodou slévárenských metod je výroba tvarově složitých odlitků, možnost volby pórovitosti a rozměru buněk. Slévárenské technologie jsou především využívány k výrobě kovových pěn s otevřenými buňkami, z důvodu nutnosti odstranění materiálu, který byl nosnou kostrou pro vytvoření požadované struktury. Je zde možnost výroby pěn s uzavřenými buňkami, ale za předpokladu, že materiál, který dané buňky tvoří, zůstává v odlitku. Podle použitého materiálu to znamená přírůstek hmotnosti pěny a ovlivnění vlastností pěny. Pro tvorbu materiálu s uzavřenými buňkami se proto spíše využívá technologie přímého zpěnění plynem [31,32].

3.1.2.1 Materiály s mřížovou strukturou

Materiály s mřížovou strukturou jsou vysoce porézním kovem s pravidelnou strukturou označovanou jako mřížka. Podíl kovu ve struktuře je často menší než 20%. Plošným tvářením, mikrosvařováním a dalšími různými metodami pojení plátů kovu, lze získat materiál s pravidelnou mřížovou strukturou. V současné době stoupá zájem o tyto materiály vyrobené pomocí slévárenských metod (obrázky 3.5 a 3.6). Výhodou slévárenských metod oproti výše jmenovaným metodám je, že nevyžadují složitou montáž a způsob výroby pro dosažení požadované struktury. Další výhodou je širší škála kovů a slitin, které lze pak odlévat v různých geometrických tvarech [31,32]. Typická vlastnost materiálu s mřížovou strukturou je pravidelná struktura skládající se ze stejných jednotlivých buněk, jejichž rozměry se pohybují od desítek mikrometrů až po desítky milimetrů. Pro tuto technologii výroby se používá metoda lití na vytavitelný nebo spalitelný model. Jako materiály jsou pak používány vosky či polymery, kdy modely jsou vyráběny pomocí vstřikování nebo lepením jednotlivých součástí po vrstvách za použití lepidla (polystyrénové modely) [4]. V případě technologie odpařitelného modelu je často využíván model z ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) plastu, který je připojen ke vtokové soustavě vyrobené z vosku. Celá tato soustava je pak obalená keramickou licí suspenzí, po jejím vytvrzení dochází k odstranění modelu pomocí žhání. Takto vzniklá soustava je pak zaplněna kovem. Z důvodu malého průměru kanálku lze pro danou technologii použít pouze ty slitiny, které mají dobrou zabíhavost [31,32]. Některé z technologií pro výrobu kovových pěn vyžadují přísadu do taveniny v podobě keramických částic, které snižují viskozitu taveniny. Dochází tak ale k zanášení kovu nežádoucími látkami. Tyto látky jsou pak kvůli své tvrdosti zásadním problémem při obrábění. Také zároveň zvyšují náročnost recyklace. Daná technologie přísadu keramických nevyžaduje, tudíž odpadá řešení zmíněných problémů [33].



Obr. 3.5 Mřížová struktura odlitků [34]



Obr. 3.6 Mřížová struktura odlitků [35]

3.1.2.2 Zalití prekurzorů

Tato technologie využívá odlévání kovu do forem, kde dutina formy je vyplněna granulemi (anorganické či organické, obr. 3.7) nebo dutými kuličkami, které jsou označovány jako prekurzory. Výhodou této technologie je možnost kontroly pórovitosti. Na základě předem známé granulometrie prekurzoru lze podle potřeb a požadovaných vlastností pěny zvýšit podíl kovu v objemu pěny. Další výhodou je také velká škála slitin, které lze použít pro tuto metodu. Jako organické prekurzory jsou používány kuličky z různých polymerních materiálů. V případě jejich použití musí být tuhnutí kovu dostatečně rychlé, protože jinak by došlo k předčasnému vyhoření prekurzoru a následnému zborcení struktury. Jako anorganické prekurzory lze použít kuličky z pěnového skla, duté kuličky z oxidu hlinitého, rozpustné soli, pískové pelety, vermikulit, pálenou hlínu. Je několik hlavních podmínek výroby, které musí být splněny pro dosažení požadovaného výrobku. Pokud materiál prekurzoru dosahuje vysokých hodnot pro odvod tepla, může dojít k předčasnému zatuhnutí taveniny. Jako řešení byl zaveden přehřev prekurzorů [4,36,37].

Organické prekurzory	Polymerní kuličky, organický materiál
Anorganické prekurzory	Soli (granulát NaCl), keramika, kov, sklo, vermikulit

Obr. 3.7 Dělení prekurzorů

Značnou nevýhodou této technologie je vysoká míra nahodilosti uspořádání pórů. Tato technologie sice umožňuje dobře regulovat poměr množství kovu a pórů v odlitku.

Díky předem známému objemu dutiny ve formě a objemu prekurzorů, které jsou nasypány do formy. To je však možné pouze tehdy, pokud jsou využívány prekurzory jednotného tvaru a rozměru. Rozmístění prekurzorů v odlitku je pak výsledkem několika faktorů. Jedním z nich způsob uložení prekurzorů ve formě (nasypání nebo uložení) a procentuální zaplnění objemu dutiny formy prekurzory. Dalším je pak průběh plnění dutiny formy, který je ovlivněn změnou průtočnosti při poklesu hladiny kovu v pánvi. Tento problém by se dal vyřešit tlakovým litím nebo zvýšením tlaku nad hladinou v pánvi. Interakce zmíněných faktorů může mít za následek odlitek na obrázku 3.8, který vykazuje nehomogenní rozmístění pórů ve struktuře odlitku [4,36].



Obr. 3.8 Kovová pěna vyrobená pomocí prekurzorů [1]

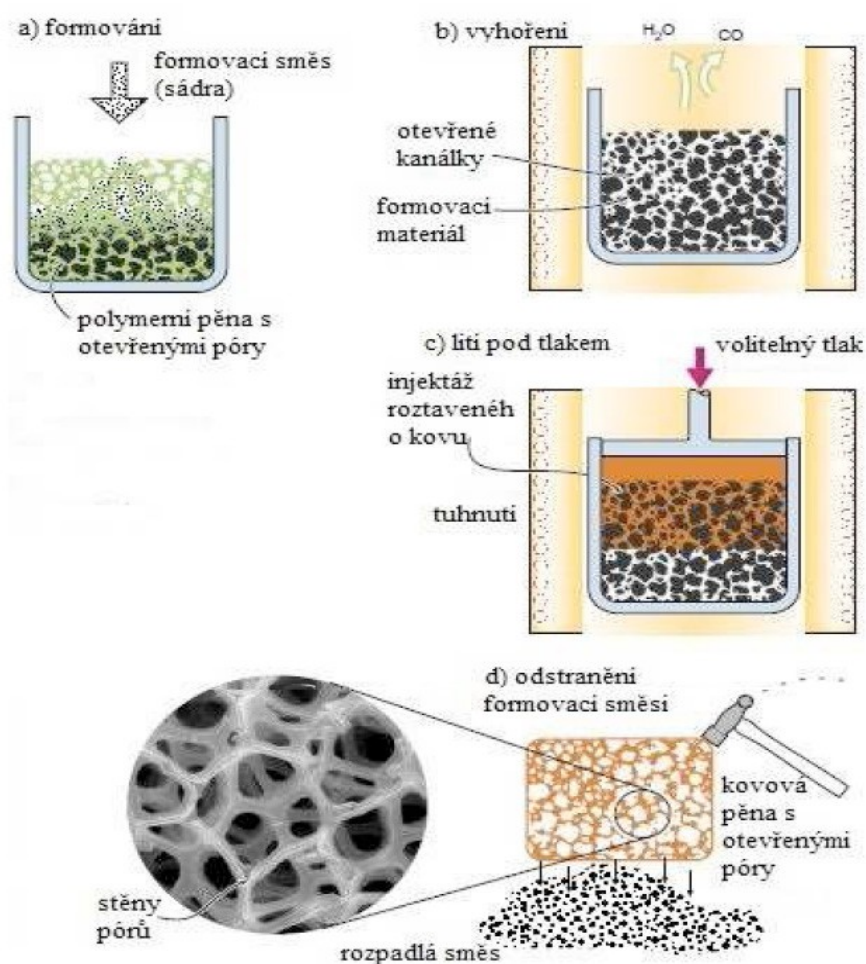
Výsledkem těchto faktorů pak bývá, že dva tvarově shodné odlitky vykazují rozdílné hodnoty mechanických vlastností v důsledku rozdílné morfologie pórů. Není tak zcela zaručena sériovost produktu. Následkem je vysoké procento „zmetkovitosti“ vůči potřebě odlít co největší množství shodných výrobků [36,37].

Různé slitiny mají různé hodnoty povrchového napětí, a proto nemusí dojít ke smáčení prekurzoru kovem. Důsledkem pak bývá nevyplnění všech mezer mezi prekurzory. Částečným řešením tohoto problému je přehřátí slitiny, která je tavena buď v ochranné atmosféře anebo ve vakuové peci, aby nedocházelo k přebytečnému naplyňování taveniny. Následně je odlévána vyšší rychlostí než u gravitačního odlévání (zvýšení tlaku nad hladinou taveniny při odlévání) [8].

3.1.2.3 Lití na odpařitelný model

Pěny vyrobené technologií odpařitelného modelu jsou využívány především jako výměníky tepla, pohlcovače zvuku, filtry a tlumiče nárazů. Nejpoužívanějšími kovy

pro tuto technologii jsou slitiny hliníku, mědi, cínu, niklu a zinku. Takto vyrobená pěna dosahuje pórovitosti 80 až 97 %, přičemž velikost pórů se pohybuje od 0,5 do 4 mm. Zjednodušené schéma výroby lze vidět na obrázku 3.9. Hlavními nevýhodami tohoto procesu jsou malý objem výroby, jeho samotná nákladnost a také složitost výrobního postupu. K výrobě modelu je použita polymerní pěna s otevřenými póry. Dutiny tohoto polymeru se vyplňují materiálem s dostatečnou tekutostí pro dokonalé zkopírování modelu a dostatečnou žáruvzdorností (sádra, směs mulitu, fenolové pryskyřice). Forma je žíhána při teplotě 700°C, při této teplotě dochází k odpaření polymerní pěny. Tato technologie má také vysoké nároky na zabíhavost slitiny, proto je k odlévání využívána kombinace předehřevu formy a tavení ve vakuové peci. Slitina je také odlévána při vyšších teplotách a rychlostech než u gravitačního odlévání [4,25,28,30].



Obr. 3.9 Schéma výroby za pomoci polymerní pěny [38]

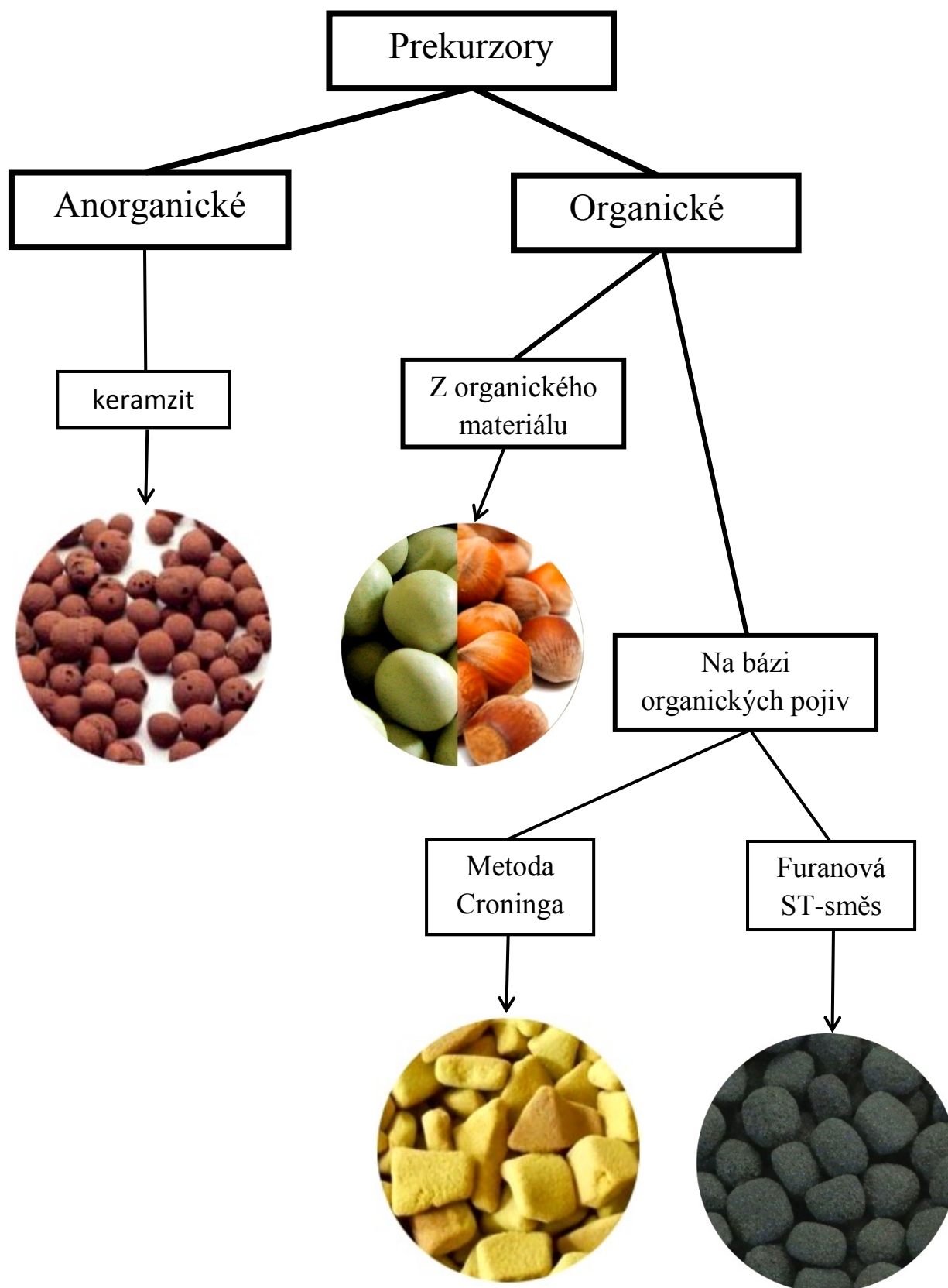
4. Praktická část

Praktická část diplomové práce se zaměřuje na slévářenskou metodu výroby kovové pěny pomocí prekurzorů. Princip této technologie je popsán v kapitole 3.1.1.2. Na prekurzory jsou kladeny určité požadavky: jednotný tvar a rozměr (koule), chemická a teplotní stálost, nízký odvod tepla, zdravotní nezávadnost, dobrá rozpadavost po odlití. Tvar koule zajišťuje dostatečně velké styčné plochy pro vytvoření průchodů mezi jednotlivými buňkami. Tyto průchody slouží k odstranění prekurzorů po ztuhnutí odlitku, proto je také důležitá dobrá rozpadavost po odlití. V odlitcích vyrobených touto technologií jsou velmi tenké stěny, proto je vyžadován nízký odvod tepla prekurzoru, aby nedocházelo k předčasnému ztuhnutí slitiny. Na Katedře metalurgie a slévárenství VŠB – TU Ostrava je prováděn výzkum této technologie. Bylo provedeno několik pokusů s keramickým materiálem keramzitem a prekurzory na organické bázi (metoda Croninga, organické kuličky). Praktická část diplomové práce navazuje na experimenty s prekurzory na bázi organických pojiv.

Cílem této diplomové práce je zajištění výroby prekurzorů o výše zmíněných požadavcích za použití materiálů běžně dostupných ve slévářenském provozu. Proto byla jako materiál prekurzorů zvolena samotuhnoucí furanová směs (furanová ST-směs). Tato formovací směs je hojně využívána ve slévárnách s malosériovou nebo kusovou výrobou. Pokud je přechování směsi prováděno ručně, vzniká v některých případech odpadní směs (zarovnání dělicí roviny formy), která je vrácena zpět do regenerace bez dalšího využití. Tato odpadní směs by mohla být využita pro výrobu prekurzorů.

V praktické části byl zkoumán zvolený technologický postup výroby prekurzorů z furanové ST-směsi. Za použití těchto prekurzorů bylo odlito několik vzorků z různých slitin. Na odlitcích byly zkoumány vlastnosti a vlivy prekurzorů z furanové ST-směsi při výrobě kovových pěn.

4.1 Technologie výroby kovových pěn pomocí prekurzorů



Obr. 4.1 Schéma rozdělení prekurzorů [39]

Na obrázku 4.1 lze vidět schéma rozdělení prekurzorů, které byly zkoumány na Katedře metalurgie a slévárenství. Keramzitovými a organickými prekurzory se zabývala ve své diplomové práci Ing. Irina Zyryanová, výsledky těchto experimentů jsou popsány níže. Prekurzory na bázi organických pojiv (metoda Croninga) zkoumala ve své diplomové práci Ing. Ivana Kroupová. Praktická část této diplomové práce volně navazuje na tento způsob výroby prekurzorů.

4.2 Anorganické prekurzory

4.2.1 Keramzitové prekurzory

- Výhody
- kulovitý tvar
 - vysoká pevnost
 - chemická stabilita
 - objemová stabilita do teploty 1050°C
 - nulový obsah cizorodých a organických částic
 - odolnost proti vlhkosti
 - zdravotní nezávadnost
 - nízká tepelná vodivost (od 0,09 W. m⁻¹.K⁻¹)
 - možnost dodávek monofrací o požadované velikosti [39]



Obr. 4.2 Var. A Odlitek se spodním zaústěním (vlevo)

Var. B odlitek s horním zaústěním (vpravo) [1]



Obr 4.3 Vlevo odlitek s frakcí 8 až 16 mm, vpravo odlitek s frakcí 3 až 4 mm [1]

V tomto pokusu byly odlity 4 vzorky z hliníkové slitiny (obrázky 4.2 a 4.3). Odlitky byly různě zaformovány s odlišnými způsoby plnění. Za těchto podmínek bylo shledáno, že spodní plnění má větší účinnost nežli plnění vrchem. Odlitky na obrázku 4.2, u nichž byla použita frakce s rozměrem 3 až 4 mm, vykazovaly nezaběhnutí tekutého kovu. U odlitků na obrázku 4.3, bylo provedeno žíhání keramzitu při teplotě 150°C – 200°C. Takto předežhřátý keramzit byl pak zakládán do forem. Ani tato úprava technologie neměla vliv na zabíhavost slitiny u frakce s rozměry 3 až 4 mm [1].

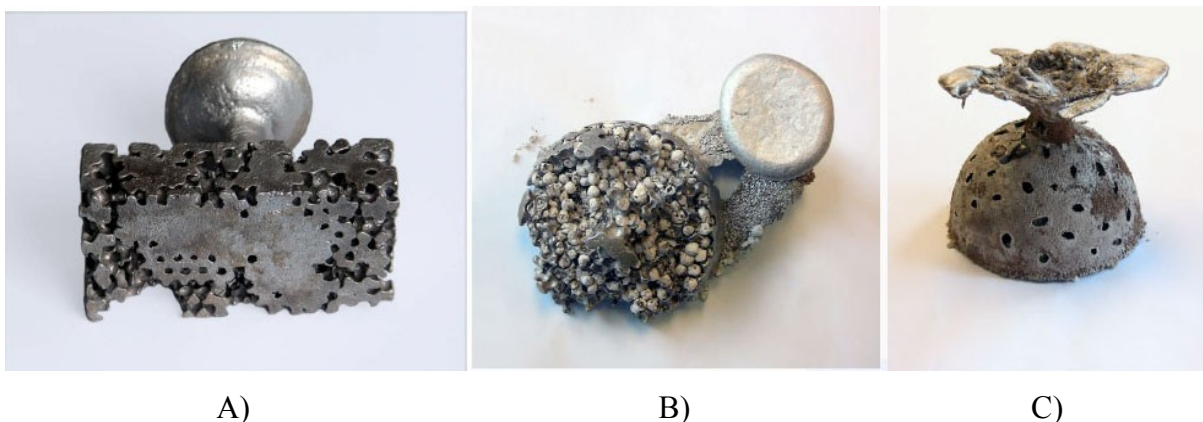
4.3 Organické prekurzory

4.3.1 Prekurzory z organického materiálu

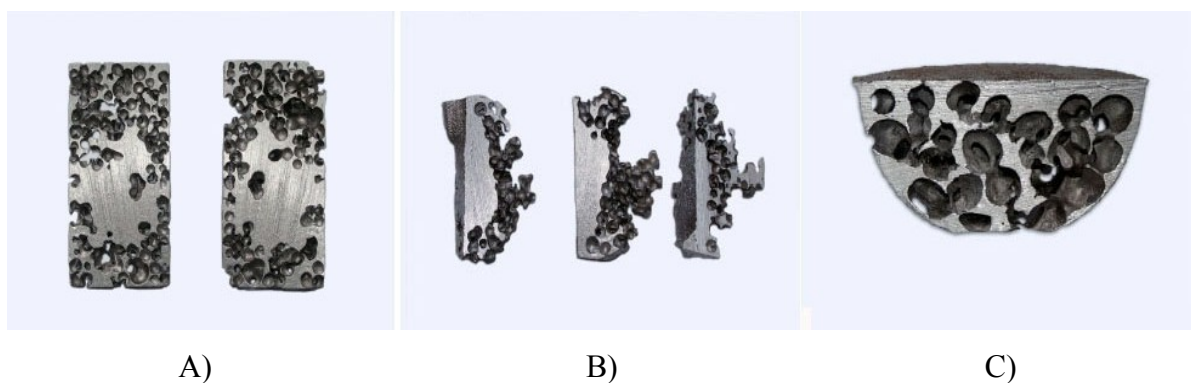
- Výhody
- dostupnost
 - cena
 - dodávka již hotových prekurzorů

V tomto experimentu byl jako materiál prekurzorů použit hrách (obr. 4.4, odlitky A a B) a ořechy (obr 4.4, odlitek C). Dutiny forem ve všech třech případech byly vyplněny ze 75 %. Z obrázku 4.5, kde je zobrazen řez odlitku A) je patrné, že díky nízké hmotnosti byly prekurzory odplaveny proudem tekutého kovu ke stěnám formy. Výsledkem byla nehomogenní struktura pórů v odlitku. Hodnota pórovitosti byla v tomto případě 54 %. Odlitek B, u kterého byla provedena změna tvaru a způsob plnění, z větší části nezaběhl.

Pórovitost u odlitku C) dosáhla hodnoty 62%. Značnou nevýhodou těchto organických prekurzorů je nemožnost přehřevu a nároky na uskladnění tohoto materiálu [1].



Obr. 4.4 Odlitky vyrobené použitím organických prekurzorů [1]



Obr. 4.5 Provedené řezy odlitků [1]

4.3.2 Prekurzory na bázi organických pojiv

4.3.2.1 Prekurzory vyrobené metodou Croninga

- Výhody
- využití vyřazených jader
 - dobrá rozpadavost po odlití
 - nenáročnost na přípravu

Princip spočívá v rozbití vyřazeného jádra na menší kusy. Tyto menší kusy byly pak následně vloženy do síťového mlýna, kde bylo provedeno zaoblení hran. Výsledkem byly prekurzory nejednotného tvaru a rozměru (obrázek 4.6) [40].



Obr. 4.6 Prekurzory vyrobené pomocí C-metody

4.4 Výroba prekurzorů ze samotuhnoucí furanové směsi

V tomto experimentu byla jako materiál prekurzorů zvolena furanová ST-směs. Tato směs má poměrně dobré otěrové vlastnosti i rozpadavost po odlití. Teplota rozpadavosti se pohybuje okolo 500°C, takže ji lze použít pro slitiny s lící teplotou nad 600°C. Lící teplota nad 600°C by měla zaručit dostačené vyžhání směsi a dobrou rozpadavost po odlití. Složení furanové ST-směsi je vypsáno v tabulce 4.1. Pro namíchání směsi byly použity přípravky běžně používané ve slévárenském provozu. Do směsi byla nejprve přidána kyselina, daná směs se promíchala 45 vteřin. Poté byla přidána pryskyřice a směs se opět promíchala 45 vteřin. Následně byla zaformována do připravené mřížky (obr. 4.7), kde se 30 minut vytvrzovala.

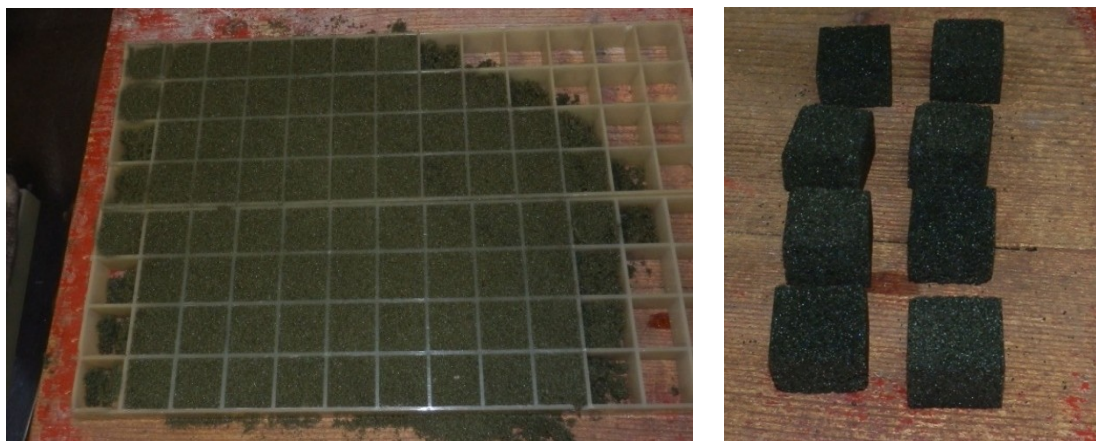


Obr 4.7 Plastová mřížka pro formování prekurzorů

Jako modelové zařízení pro výrobu prekurzorů byla použita plastová mřížka (obr. 4.7). Přímá výroba kulovitých prekurzorů z furanové ST-směsi by byla příliš problematická. Proto byl jako základ prekurzorů vybrán tvar krychle o hraně 25 mm. Tato krychle byla vložena do síťového mlýna. Daný rozměr by měl zaručit dostatečný objem prekurzoru pro erozi v síťovém mlýně a dosažení tvaru co nejvíce podobnému kouli.

Tab. 4.1 Složení samotuhnoucí furanové směsi

Složka směsi	Obchodní název	Podíl objemu
Ostřívo (křemenný písek)	Šajdíkovy humence SH 35	100 hm. %
Pojivo (pryskyřice)	Askuran MG+	1,2 hm. %
Tvrdidlo (kyselina)	Harter Rapid 50	50 % hmotnosti pojiva



Obr. 4.8 Zaformovaná směs a hotové krychličky pro další úpravu

Na obrázku 4.8 můžeme také vidět již z jaderníku vytažené krychličky. Ty byly pak ponechány dalších 24 hodin, aby došlo k dokonalému vytvrzení směsi. Tyto krychličky byly pak po šesti kusech vkládány do síťového mlýna, kde docházelo k omílání. Jak je možné vyčíst s tabulky 4.2, úbytek na váze se pohybuje mezi 40 % až 60 %. Na obrázku 4.9 lze vidět dřevěnou kulatinu, která byla použita jako protiváha prekurzorů při otáčení mlýnu. Také napomáhala omílání prekurzorů. Stanovení času potřebného k vytvoření požadovaného tvaru prekurzorů bylo provedeno pokusem. V prvním případě byly prekurzory ponechány v mlýně po dobu 12 minut, u 3 prekurzorů došlo k úplnému rozpadnutí. V druhém případě byl rozměr prekurzoru v poměru k ostatním natolik malý, že nebylo možné prekurzor použít pro odlévání pěny. Optimální doba v mlýně byla stanovena mezi 6 až 8 minutami. Zmetkovitost byla v tomto případě zhruba 10 – 15 %.

Tabulka 4.2 Měření eroze v síťovém mlýnu

č.m.	ks	m_1 [g]	t [min]	m_2 [g]	použitelné
1	6	133,33	12:00	73,67	3
2	6	115,37	10:00	58,58	5
3	6	124,28	8:00	67,23	6
4	6	124,55	6:00	68,18	6
5	6	126,32	6:00	70,25	5

- č.m. - číslo měření
ks - počet prekursorů vložených do mlýna
 m_1 - hmotnost na začátku měření
t - čas omílání v mlýně
 m_2 - hmotnost na konci měření
použitelné - počet použitelných prekursorů po vytažení z mlýna



Obr 4.9 Síťový mlýn a prekursory připravené k erozi



Obr 4.10 Prekursorzy po provedené úpravě tvaru

Na obrázku 4.10 lze vidět různost tvarů, které vznikly erozí v mlýně. Daných šest prekurzorů bylo vytaženo po šesti minutách. Za daných podmínek není možné získat tvar koule. Možným řešením by mohlo být zaoblení hran prekurzoru před vložením do mlýna. Pro zaoblení hran by muselo být upraveno modelové zařízení. Zaoblené hrany by mohly napomoci omílání ve mlýně a dosažení kulatějšího tvaru prekurzoru.

4.4.1 Výroba formy

Jako materiál formy byla použita bentonitová směs. Obsah vody v této směsi činil 4%. Lití tak bylo prováděno do formy „na syrovo“. Povrch formy nebyl nijak upravován, tudíž bylo nutné počítat s možným naplyněním povrchu odlitku. Jako modelové zařízení byly použity dřevěné modely. První model ve tvaru kvádru, jehož rozměry jsou 148x148x50 mm. Druhý model ve tvaru válce s průměrem 215 mm a výškou 45 mm. Na obrázku 4.11 můžeme vidět jednu z forem již připravenou pro složení, dutina je vyplněna prekurzory do výše dělicí roviny. Zároveň jsou uloženy ve formě tak aby zaujímaly co největší objem v dutině formy. Pro plnění dutiny formy byl použit jeden zářez, který měl stejnou výšku jako odlitek.



Obr. 4.11 Forma vyplněná prekurzory vyrobených z furanové ST-směsi

4.4.2 Odlévání

Jako materiál kovové pěny byly použity 3 slitiny, chemické složení je vypsáno v tabulce 4.3. Slitiny hliníku patří díky své ceně a slévárenským vlastnostem mezi nejpoužívanější při výrobě kovových pěn. Slitiny mědi se využívají v oblasti tepelné techniky, nejčastěji je pěna použita jako obalový materiál pro trubky výměníků. Slitina železa byla vybrána, protože díky svým mechanickým vlastnostem a teplotní stálosti převyšuje hodnoty slitin hliníku a mědi.

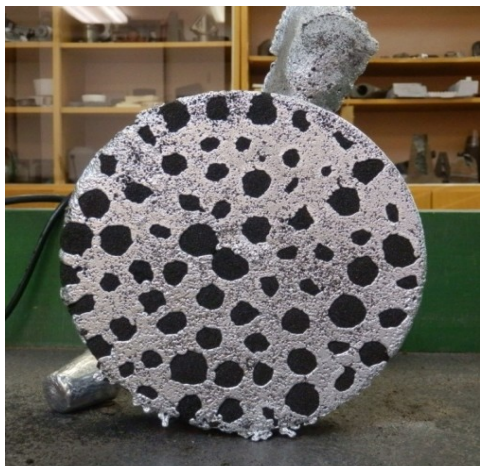
Tabulka 4.3 Chemické složení slitin [41,42,43]

EN AC- AlSi10Mg												
C	Mn	Si	P	S	Sb	Ni	Zn	Pb	Sn	Cu	Ti	Fe
-	<0,45	9,0 -11,0	-	-	-	<0,05	<0,10	<0,05	<0,05	<0,05	<0,15	<0,55

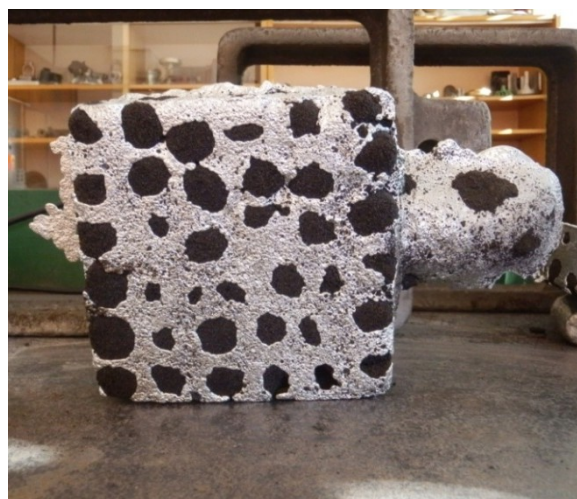
CuSn10- C-GS												
C	Mn	Si	P	S	Sb	Ni	Zn	Pb	Sn	Cu	Ti	Fe
-	<0,1	<0,02	<0,2	<0,05	<0,2	<2,0	<0,5	<1,0	9,0-11,0	88,0-90,0	-	<0,2

EN-GJL- 200												
C	Mn	Si	P	S	Sb	Ni	Zn	Pb	Sn	Cu	Ti	Fe
3,3-3,5	0,4-0,6	1,8 -2,1	<0,5	<0,15	-	-	-	-	-	-	-	-

Na obrázku 4.12 a 4.13 lze vidět odlitky ze slitiny hliníku EN AC-**AlSi10Mg**. Objem dutiny formy byl zcela zaplněn prekurzory. Odlitky zaběhly v celém objemu. Rozpadavost ST-směsi po odlití byla dobrá a odstranění prekurzorů z odlitků proběhlo bez problémů. Na obrázku 4.14 lze vidět oba odlitky po odstranění prekurzorů. Nedošlo k žádné penetraci ani připečení ST-směsi.



Obr. 4.12 Odlitek kovové pěny z hliníkové slitiny EN AC-ALSi10Mg (teplota lití 742°C)

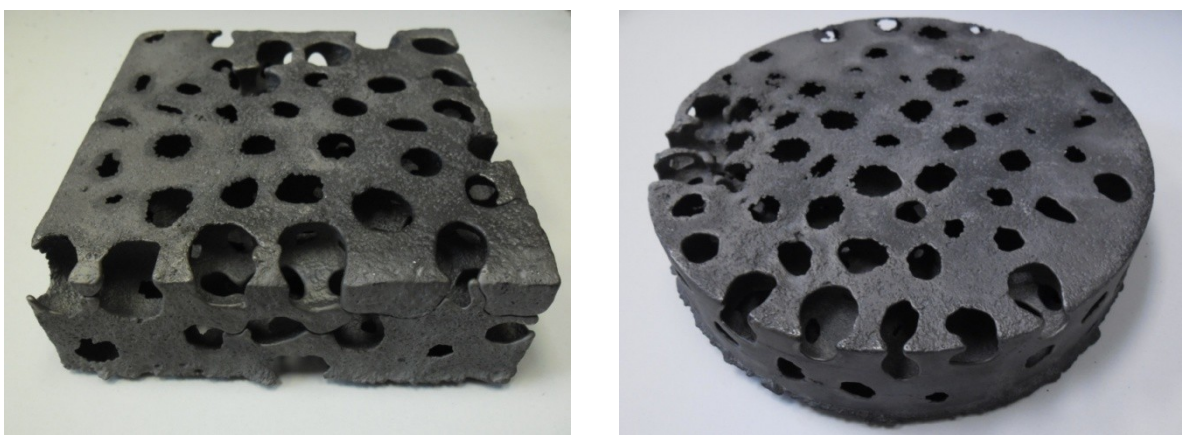


Obr. 4.13 Odlitek kovové pěny z hliníkové slitiny EN AC-ALSi10Mg (teplota lití 764°C)



Obr 4.14 Odlitky z EN AC-ALSi10Mg po odstranění prekurzorů

Následně byly odlity vzorky z litiny s lupínkovým grafitem za použití stejných modelů a podmínek formování. Ze škály litin s lupínkovým grafitem byla vybrána EN-GJL-200. Jak už bylo řečeno, tato slitina byla vybrána pro své mechanické vlastnosti a odolnosti vůči vyšším teplotám. Navíc je možné z této slitiny odlévat tenkostěnné odlitky díky dobré zabíhavosti, kterou lze podpořit přidáním fosforu (maximální koncentrace uvedena v tab. 4.3). Na obrázku 4.15 lze vidět oba odlitky po vybití prekurzorů, které se díky lící teplotě 1310°C rozpadaly lépe než u odlitků ze slitiny hliníku. Navzdory vysoké tekutosti a lící teplotě nedošlo k penetraci slitiny do prekurzorů. V obou případech se na okrajích odlitků vyskytovaly studené spoje.



Obr 4.15 Odlitky z EN-GJL-200 po odstranění prekurzorů

Na obrázku 4.16 lze vidět poslední odlitek, který byl odlit ze slitiny CuSn10-C-GS. Předchozí odlitky vždy zaběhly v celém objemu. Daná změna tvaru odlitku neměla vliv na zabíhavost slitiny. Lze předpokládat, že morfologie pórů v odlitcích bude obdobná. Daný odlitek i prekurzory vykazovaly podobné vlastnosti jako předchozí odlité vzorky.

Tvar jednotlivých pórů byl oválný a rozměry v největším průměru póru se pohybovaly od 14 do 20 mm. Přestože se vždy podařilo odstranit všechny prekurzory z odlitků, nebyl odlitek zcela průchodný a některé póry byly zakončeny „slepou uličkou“. Zejména v horní stěně odlitku, kde došlo k překrytí prekurzoru tekutým kovem.



Obr 4.16 Odlitek z CuSn10-C-GS po odstranění prekurzorů

4.4.3 Výsledné vlastnosti

4.4.3.1 Pórovitost

1) Objem dutiny formy

Kvádr

$$a = 0,148 \text{ m}$$

$$b = 0,148 \text{ m}$$

$$\underline{c = 0,05 \text{ m}}$$

$$V_k = a \cdot b \cdot c$$

$$V_k = 0,148 \cdot 0,148 \cdot 0,05$$

$$\underline{\underline{V_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}}$$

Válec

$$d = 0,215 \text{ m}$$

$$\underline{v = 0,045 \text{ m}}$$

$$V_v = \pi \cdot r^2 \cdot v$$

$$V_v = \pi \cdot 0,1075^2 \cdot 0,045$$

$$\underline{\underline{V_v = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}}$$

2) Výpočet hrubé hmotnosti odlitku s plným průřezem

EN AC-ALSi10Mg

$$V_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_v = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\rho = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$m_k = V_k \cdot \rho$$

$$m_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2650$$

$$\underline{m_k = 3 \text{ kg}}$$

$$m_v = V_v \cdot \rho$$

$$m_v = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2650$$

$$\underline{m_v = 4,3 \text{ kg}}$$

EN-GJL-200

$$V_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_v = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\rho = 7200 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$m_k = V_k \cdot \rho$$

$$m_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 7200$$

$$\underline{m_k = 7,92 \text{ kg}}$$

$$m_v = V_v \cdot \rho$$

$$m_v = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 7200$$

$$\underline{m_v = 11,52 \text{ kg}}$$

CuSn10-C-GS

$$V_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_v = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\rho = 8700 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$m_k = V_k \cdot \rho$$

$$m_k = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 8700$$

$$\underline{m_k = 9,57 \text{ kg}}$$

3) Výpočet hodnoty pórovitosti odlitých vzorků

EN AC-ALSi10Mg

$$m_k = 3 \text{ kg}$$

$$\underline{M_k = 1,435 \text{ kg}}$$

$$P_k = 100 - \left(\frac{M_k}{m_k} \cdot 100 \right)$$

$$P_k = 100 - \left(\frac{1,435}{3} \cdot 100 \right)$$

$$\underline{P_k = 52,2 \%}$$

$$M_v = 2,11 \text{ kg}$$

$$\underline{m_v = 4,3 \text{ kg}}$$

$$P_v = 100 - \left(\frac{M_v}{m_v} \cdot 100 \right)$$

$$P_v = 100 - \left(\frac{2,11}{4,3} \cdot 100 \right)$$

$$\underline{P_v = 50,9 \%}$$

EN-GJL-200

$$m_k = 7,92 \text{ kg}$$

$$\underline{M_k = 3,745 \text{ kg}}$$

$$P_k = 100 - \left(\frac{M_k}{m_k} \cdot 100 \right)$$

$$P_k = 100 - \left(\frac{3,745}{7,92} \cdot 100 \right)$$

$$\underline{P_k = 52,7 \%}$$

$$m_v = 11,2 \text{ kg}$$

$$\underline{M_v = 5,645 \text{ kg}}$$

$$P_v = 100 - \left(\frac{M_v}{m_v} \cdot 100 \right)$$

$$P_v = 100 - \left(\frac{5,645}{11,2} \cdot 100 \right)$$

$$\underline{P_v = 49,6 \%}$$

CuSn10-C-GS

$$m_k = 9,57 \text{ kg}$$

$$\underline{M_k = 3,76 \text{ kg}}$$

$$P_k = 100 - \left(\frac{M_k}{m_k} \cdot 100 \right)$$

$$P_k = 100 - \left(\frac{3,76}{9,57} \cdot 100 \right)$$

$$\underline{P_k = 60,7 \%}$$

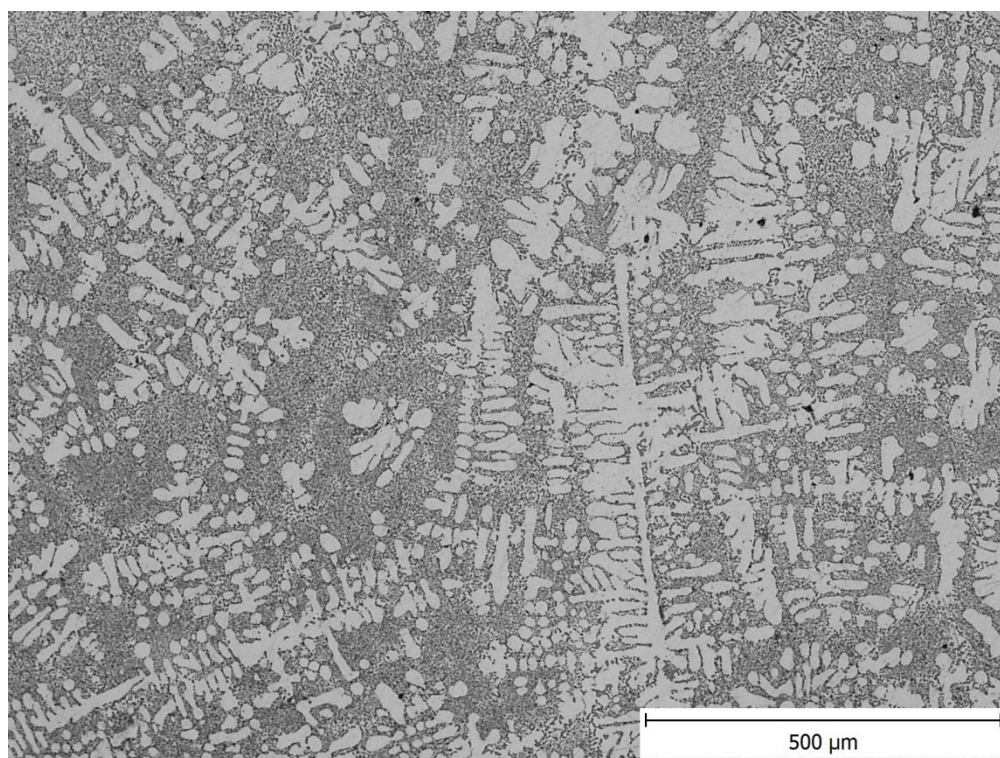
Kde: V_k - objem dutiny formy – kvádr [m^3]
 V_v - objem dutiny formy – válec [m^3]
 m_k - teoretická hmotnost odlitku s plným průřezem – kvádr [kg]
 m_v - teoretická hmotnost odlitku s plným průřezem – válec [kg]
 M_k - skutečná hmotnost kovové pěny – kvádr [kg]
 M_v - skutečná hmotnost kovové pěny – válec [kg]
 P_k - hodnota pórovitosti kvádrů [%]
 P_v - hodnota pórovitosti válců [%]
 ρ - hustota dané slitiny [$kg \cdot m^{-3}$]

Na základě vypočtených hodnot hmotností odlitků s plným průřezem a hmotností vyrobených odlitků byla stanovena pórovitost jednotlivých odlitků. Před vážením byly odlitky zbaveny vtokových soustav a zateklin v dělicí rovině. Z daných výpočtů lze vyčíst, že v případě odlitků ze slitiny hliníku a LLG se pohybují hodnoty pórovitosti okolo 50%. U slitiny mědi bylo dosaženo pórovitosti okolo 60%.

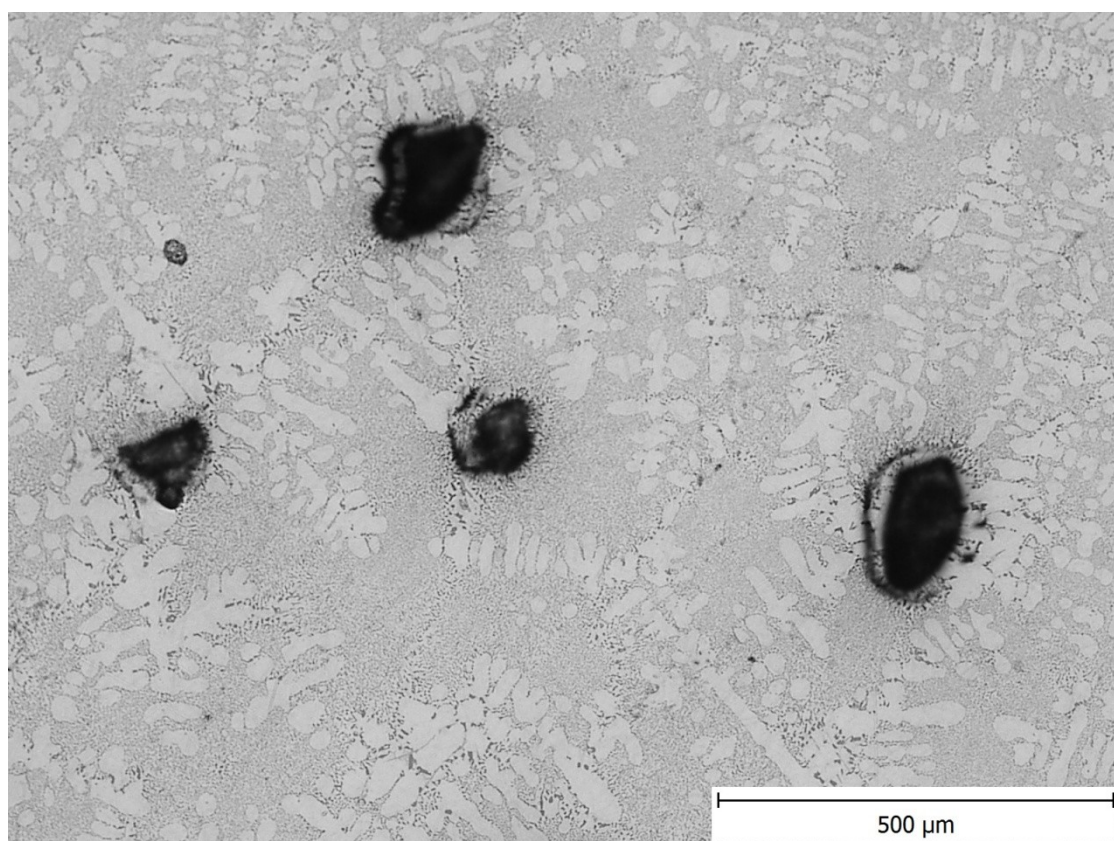
4.4.3.2 Metalografický rozbor

Na obrázcích 4.17 a 4.18 lze vidět metalografické snímky kovových pěn ze slitiny EN AC- $AlSi10Mg$. Vzniklá struktura u obou odlitků obsahuje dendrity fáze α (hliník) a stronciem modifikované eutektikum $Al - Si$. Díky tenkým stěnám v odlitku měla slitina vysokou rychlost tuhnutí a podařilo se tak dosáhnout jemnozrné struktury. Tato struktura poskytuje dobré mechanické vlastnosti. U vzorku odebraného z kvádrů byl na celé jeho ploše pozorován výskyt porezity (kombinace bubliny plynu a mikrostaženiny), na obrázku 4.18 je lze vidět jako tmavé plochy.

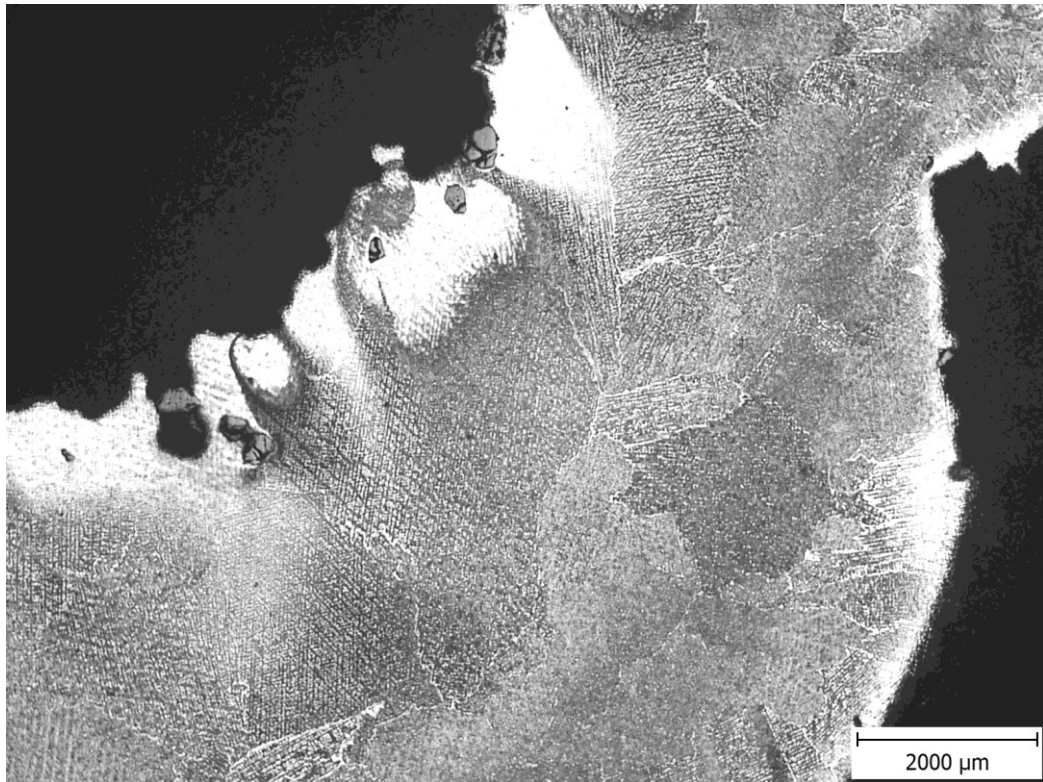
Struktura bronzů na pozorovaném metalografickém výbrusu je tvořena primárním tuhým roztokem α a eutektoidní směsí fází $\alpha(Cu) + \delta$. Koncentrace eutektoidní fáze roste s rychlostí ochlazování. Na obrázku 4.20 je zobrazena stěna mezi dvěma jednotlivými póry. Eutektoidní fáze vznikala zejména v místě styku prekurzoru a tekutého kovu, oblast s největším odvodem tepla. Tato fáze má charakteristické vlastnosti a těmi jsou tvrdost a křehkost.



Obr 4.17 Struktura odlitku ve tvaru válce ze slitiny EN AC-ALSi10Mg

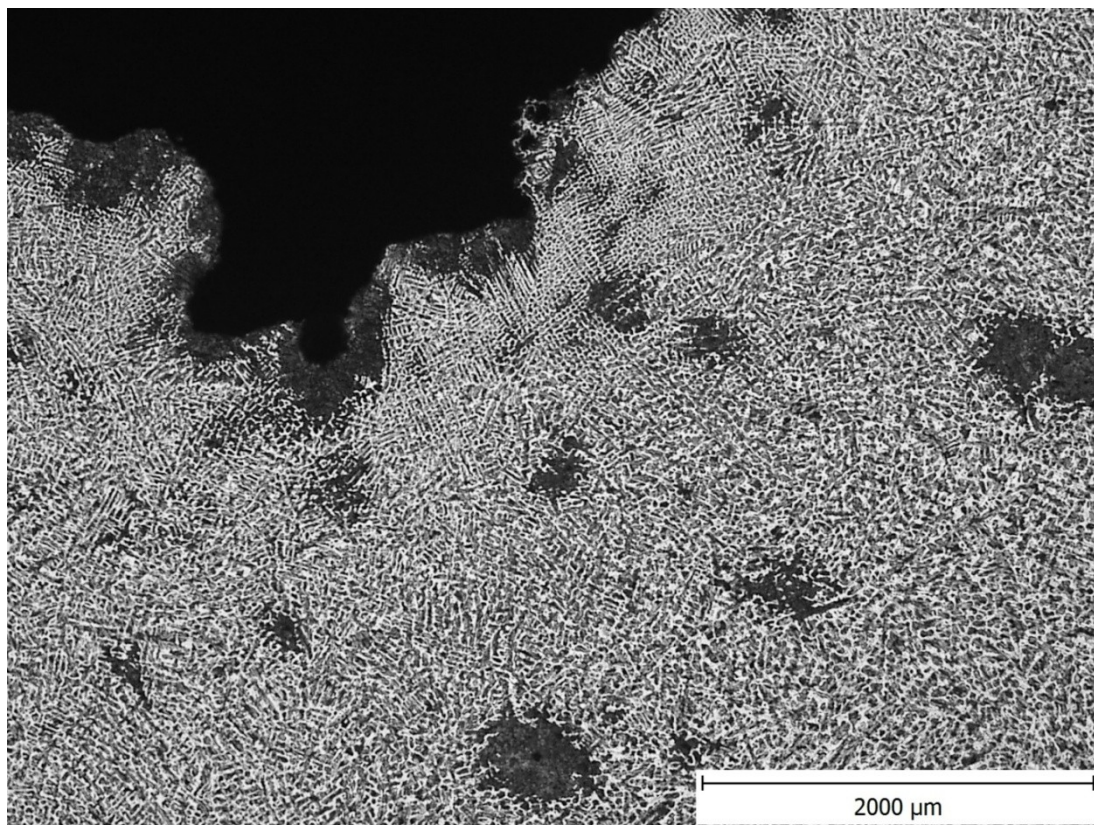


Obr 4.18 Struktura odlitku ve tvaru kvádru ze slitiny EN AC-ALSi10Mg

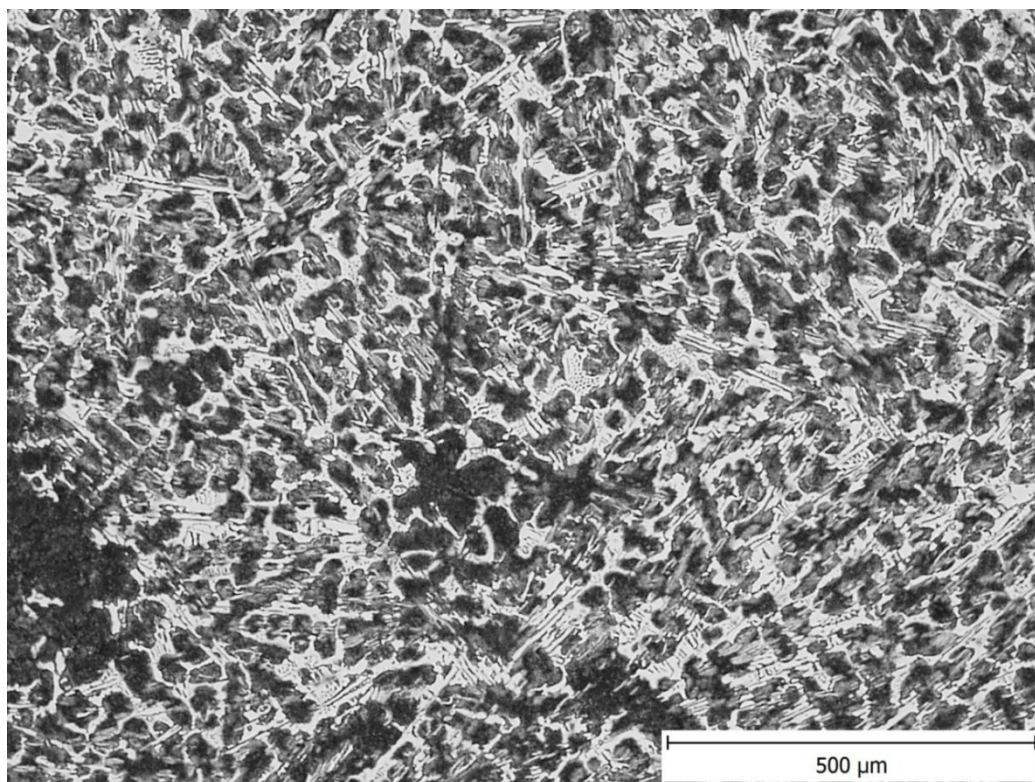


Obr. 4.20 Metalografický snímek odlitku ze slitiny CuSn10-C-GS

U odlitků ze slitiny EN-GJL-200 vznikla v obou případech stejná struktura. Jak je možné vidět na obrázku 4.20, vlivem rychlého ochlazování slitiny došlo k tuhnutí podle metastabilního systému. Na obrázku 4.21 jsou jasně viditelné jehlice cementitu, které spolu s austenitem tvoří metastabilní eutektikum (ledeburit). Také došlo k vytvoření různě velkých shluků perlitu, které se vyskytovaly po celé ploše výbrusu. Největší koncentrace perlitu byla v místě styku tekutého kovu s prekurzory. Vzniklá zákalka způsobuje zhoršenou obrobitelnost odlitku.



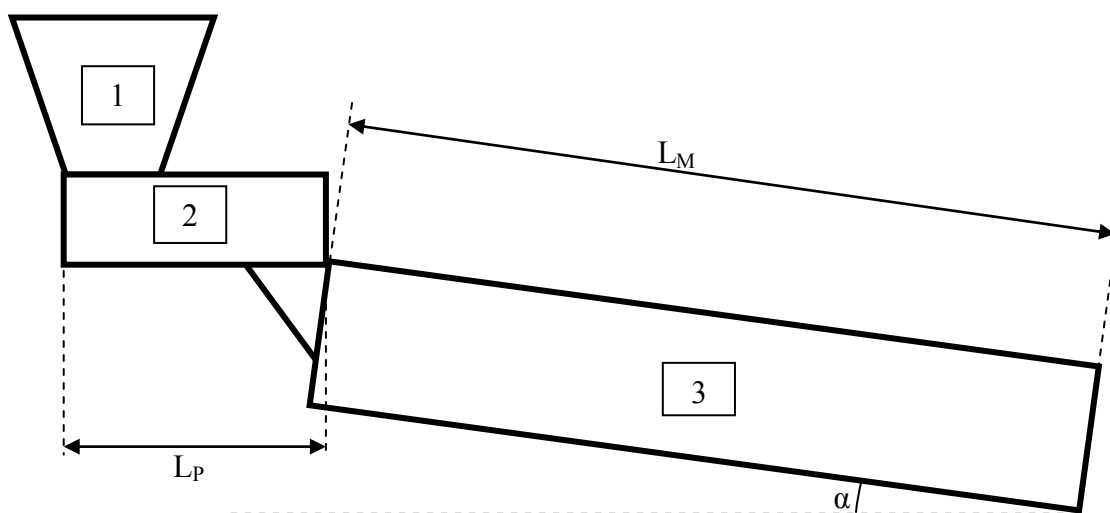
Obr 4.21 Struktura odlitku ve tvaru kvádru ze slitiny EN-GJL-200



Obr 4.21 Struktura odlitku ve tvaru válce ze slitiny EN-GJL-200

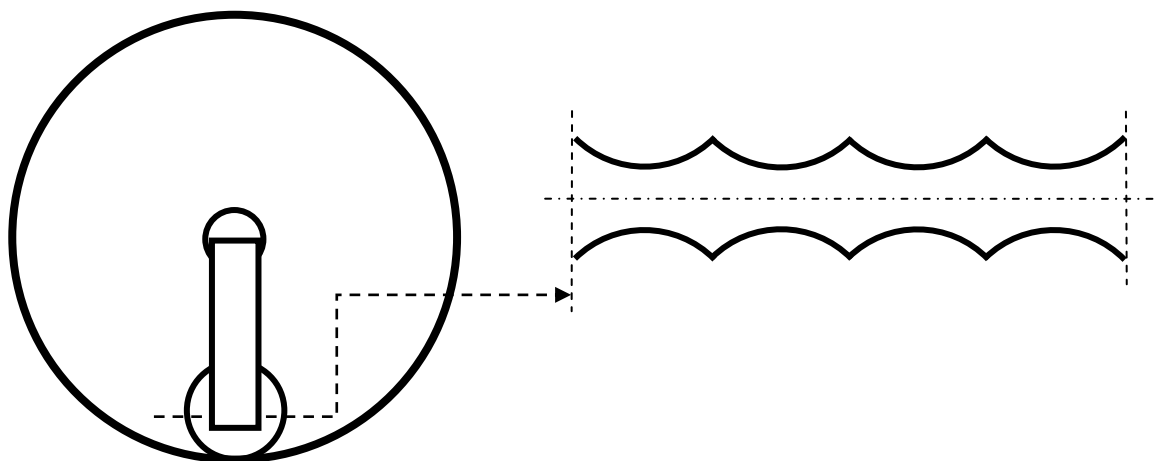
4.4.4 Teoretický návrh síťového mlýnu

Na obrázku 4.18 je zobrazen návrh síťového mlýnu. Daný mlýn je navržen tak, aby byla co nejvíce urychlena a automatizována výroba prekurzorů. Tento mlýn by se skládal z tří součástí (na obrázku označené čísly): násypka (1), šnekový podavač (2), buben síťového mlýnu (3). Tento návrh je pouze teoretický a pro praktické použití by musely být vyřešeny následující parametry. Objem násypky (1) by musel být dostatečně velký pro zajištění dlouhodobého přísunu prekurzorů do mlýna, bez nutnosti častého doplňování.



Obr. 4.18 Náčrten síťového mlýnu pro výrobu prekurzorů

Další součástí je šnekový podavač (2), u kterého je nutné jasně stanovit parametry. Podavač musí splňovat funkci dopravníku prekurzorů do síťového bubnu, a to v takovém množství, aby nedocházelo k přepĺňování mlýnu. Také by nemělo dojít k tomu, že by podavač dodával malé množství prekurzorů. Zbytečně by tak byla prodlužována výroba a nedocházelo by k plnému využití potenciálu mlýna. Proto musí být jasně definována délka podavače (L_p) a rychlost otáčení podavače. Obě tyto veličiny jsou ale závislé na parametrech samotného mlýnu. Parametry síťového mlýnu (3) musí být vztaženy vzhledem k vlastnostem směsi. Jeho délka (L_M), počet otáček a sklon (úhel α) musí zajistit dostatečnou dobu setrvání prekurzorů v mlýně, aby došlo k dostatečné erozi prekurzorů. Na obrázku 4.19 je zobrazen přídatný válec umístěný v bubnu síťového mlýnu, který by napomáhal erozi prekurzorů a urychlil tak celkový proces výroby. Na obrázku 4.14 vpravo je zobrazeno umístění a návrh tvaru pomocného válce. Tento tvar by mohl napomoci k dosažení kulovitěho tvaru prekurzorů.



Obr. 4.19 Pomocný válec pro erozi prekursorů: umístění (vlevo), řez (vpravo)

Doba setrvání prekursoru v mlýně je závislá na vlastnostech směsi, ze které je prekursor vyroben. Značnou výhodou by byla možnost regulace otáček jak šnekového podavače, tak síťového mlýnu v závislosti na vlastnostech směsi. Možností regulace otáček by se dalo reagovat na možnost změny schopnosti otěru směsi. Pokud by došlo ke snížení otěru směsi, zvýšení počtu otáček mlýna by zaručilo dostatečnou erozi prekursoru.

Závěr

Tato diplomová práce představuje kovové pěny, které díky novým technologiím nacházejí uplatnění v mnoha oblastech průmyslu. V teoretické části byly popsány vlastnosti, využití a technologie výroby kovových pěn z tekuté fáze.

Praktická část diplomové práce se zaměřuje na výrobu kovové pěny pomocí prekurzorů. Tento způsob výroby není tak rozšířen jako třeba technologie přímého zpěnění plynem. Důvodem je složitost a nákladnost výroby prekurzorů. Cílem této práce bylo vytvoření jednoduchého technologického postupu výroby kulovitých prekurzorů za využití materiálů běžně používaných ve slévárenském provozu. Jako materiál prekurzorů byla vybrána hojně využívaná furanová ST – směs. Prekurzory vyrobené z této směsi, byly použity k odlití kovových pěn z různých slitin (slitina hliníku, mědi a železa).

Takto vyrobené kovové pěny dosáhly pórovitosti více než 50 %. V případě odlitků z litiny s lupínkovým grafitem tuhnula slitina v metastabilním systému a vzniklá zákalka zhoršuje obrobiteľnost. Odlitky zaběhly vždy v celém objemu, avšak nebyly vždy zcela průchozí. Tento problém by se dal odstranit odřezáním povrchové vrstvy odlitku. Prekurzory měly ve všech případech dobrou rozpadavost po odlití a byly vždy zcela odstraněny z odlitků. Nebylo však dosaženo požadovaného kulovitého tvaru. Tvar prekurzorů byl většinou oválný. Je otázkou, zda by dalšími úpravami tohoto způsobu výroby prekurzorů bylo dosaženo kulovitého tvaru. Možnosti jsou v úpravě tvaru a rozměrů výchozího prekurzorů před úpravou v mlýně. Dalším možným řešením je i vhodná konstrukce zařízení (mlýna), která by umožnila nejen dosažení kulovitého tvaru, ale i možnost řízení velikosti prekurzorů.

použitá literatura

- [1] ZYRYANOVÁ, I.: Lité kovové pěny z Al slitin. Ostrava, 2011. Diplomová práce na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava
- [2] [http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/index36cf.html?&popis\[0\]=Mod%F8%EDn%20\(Lari x\)%20%20P%F8%ED%E8n%FD%20%F8ez%20%20zv%ECt%9Aeno%20100x&sekce=zobraz&soubor\[1\]=JEHLICNANY/MODRIN/MO_pr_10x.jpg](http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/index36cf.html?&popis[0]=Mod%F8%EDn%20(Lari x)%20%20P%F8%ED%E8n%FD%20%F8ez%20%20zv%ECt%9Aeno%20100x&sekce=zobraz&soubor[1]=JEHLICNANY/MODRIN/MO_pr_10x.jpg)
- [3] http://www.selee.com/Selee_Corporation_Metal_Foam_2.php
- [4] BANHART, J.: Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 2001, vol. 46, s. 559 - 632
- [5] MICHNA, Š.: Encyklopedie hliníku. Prešov, 2005. ISBN 80-89041-88-4
- [6] <http://camal.ncsu.edu/ebm-produced-copper-aluminum-network-structures/>
- [7] DRENCHEV, L., et al.: Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity. Materials Science and Technology, 2006, vol. 22, No 10.
- [8] GAILLARD, Y., et al.: Les mousses d'aluminium CTIF par voie de fonderie. Fonderie– Fondeurd'aujourd'hui, No. 250, 2005, s. 13 – 24
- [9] Losertová, M.: Progresivní materiály, učební text VŠB-TUO, 2012, s. 195. [online]. [cit. 2015-02-15].
URL: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf>
- [10] <http://www.cymat.com/Article.aspx?cid=28&pid=13>
- [11] <http://www.stylepark.com/en/alcarbon/alporas-ac-black-both-sided-ground>

- [12] <http://www.ergaerospace.com/Material-Applications-guide.html>
- [13] <http://www.novametcorp.com/products/incofoam/>
- [14] <http://transmaterial.net/alulight/>
- [15] <http://cekomat.sav.sk/index.php?ID=73>
- [16] BANHART, J.: Metal Foams – from Fundamental Research to Applications [online].
[cit. 2014-10-18].
URL:http://scholar.google.cz/scholar?q=BANHART,+J.:+Metal+Foams+%E2%80%93+from+Fundamental+Research+to+Applications&hl=cs&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar&sa=X&ei=YcMZVcn8AsTePa2FgTA&ved=0CB4QgQMwAA
- [17] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal_foam_Coffee_table.jpg
- [18] <http://www.umms.sav.sk/index.php?ID=366>
- [19] http://mediacenter.dw.de/english/video/item/870733/Metal_Foam_a_material_for_New_bones/
- [20] <http://manufacturing-science.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1460680>
- [21] <http://www.ergaerospace.com/Material-Applications-guide.html>
- [22] BANHART, J., WEAIRE, D.: On the road again: metal foams find favor.
Journal Physics today, 2002, July, s. 37 – 42.
- [23] COLETO, J., et al.: Fabrication de mousses métalliques a cellule ouvertes ou fermées,
par les voies de la fonderie, et application de ces mousses. Fonderie –
Fondeur d'aujourd'hui, No. 238, 2004, s. 12 – 21
- [24] <http://umms.sav.sk/index.php?ID=624>

- [25] CURRAN, D., Metal Foams [online]. [cit. 2014-11-20].
URL: <http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/>.
- [26] CURRAN, D., C. Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent. Cambridge, December 2003. 188 s. Dizertační práce. University of Cambridge.
- [27] Technical manual for CYMAT: Smart Metal CymatCorp., Canada, 2009. [online]. [cit. 2014-12-17].
URL: <http://cymat.com>.
- [28] GERGELY, V. – DEGISCHER, H. P. – CLYNE, T. W. Recycling of MMCs and Production of Metallic Foams. Comprehensive Composite Materials, 2000, 3, s. 797 - 820.
- [29] BANHART, J., Manufacturing Routes for Metallic Foams JOM, 2000, 12, 52, s. 22-27. [online]. [cit. 2014-09-21].
URL: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>.
- [30] Duocel. ERG, Inc., Oakland, CA. Materials and aero space corporation. [online]. [cit. 2015-01-25].
URL: <http://www.ergaerospace.com/index.html>.
- [31] HAYDN, N. - WADLEY, G. Multifunctional periodic cellular metals. Trans. R. Soc. A, 2006, vol. 364, s. 31–68.
- [32] CHOLEWA, M., et al.: The skeleton castings as a new type of cast lattice structures. Journal AMME, 2012, vol. 54, October. [online]. [cit. 2014-10-28].
URL: http://www.journalamme.org/papers_vol54_2/54213.pdf.
- [33] Federal Technology Group. Supporting Industry and U.S. Federal Laboratories. Advanced Materials: Cast Lattice Block Structures [online]. [cit. 2014-11-29].
URL: http://www.fedtechgroup.com/advanced_materials/lbs/lbs_cast.html.

- [34] http://www.iwu.fraunhofer.de/en/business_units/medical_engineering.html
- [35] <http://www.netfabb.com/aerospace.php>
- [36] BANHART, J. – BAUMEISTER, J. Production methods for metallic foams. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1998, vol. 521, s. 121-132.
- [37] DAIRON, J., et al.: Mousses métalliques: CTIF innovedans les matériaux cellulaires. Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, No. 295, 2009, s. 12 – 19
- [38] EVANS, A.G., et al.: The topological design of multifunctional cellular metals [online]. [cit. 2014-12-20]. s. 34 a 37.
URL: <http://www.cellularmaterials.com/papers/benchmark.pdf>.
- [39] <http://www.liapor.cz/>
- [40] KROUPOVÁ, I.: Vlastnosti a použití litých kovových pěn. Ostrava 2013. Diplomová práce na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – TUO
- [41] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [42] <http://www.kemper-olpe.de/cz/oblasti-cinnosti/odlitky/material/bronz/cusn10-c-gs/>
- [43] ROUČKA, J.: Metalurgie litin [online]. [cit. 2015-02-26].
URL: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/database-predmetu/CME/Metalurgie%20litin.pdf>